视觉时距知觉序列依赖效应的空间迁移性*

王碧瑶[1] 陈晨[1] 胡晓斐[1] 王迪[1] 李宝林[1]

([1]陕西师范大学心理学院，西安 710062)

摘要 个体当前的知觉反应不仅取决于当前的刺激输入，而且依赖于先前的感知经验，可表现为知觉的序列依赖效应。结合时距二分任务，通过三个实验系统改变先前试次和当前试次中刺激的位置关系，考察了时距知觉的序列依赖效应及其空间迁移性。结果发现，（1）先前试次的刺激时距导致了排斥性的刺激序列依赖效应，并且这种效应能够完全迁移到不同的空间位置；（2）先前试次的决策反应导致了吸引性的决策序列依赖效应，但该效应仅能部分迁移到不同的空间位置；（3）时距知觉的刺激和决策序列依赖效应的空间迁移性不受空间类型（外部空间 vs. 视网膜空间）的调节。这些结果在一定程度上反映了视觉时距知觉序列依赖效应产生的潜在神经位置：刺激序列依赖效应可能产生于对空间信息不敏感或具有较大感受野的较高级视觉加工脑区；决策序列依赖效应则可能源于具有类别组织功能的高级认知脑区。

关键词 时距知觉，序列依赖效应，时距适应，决策惯性，空间迁移

分类号 B842.2

1 引言

时距知觉是对事件持续性的一种感知，包括对某一事件持续时间或者两个相继事件之间间隔的感知(黄希庭 等, 2003)。作为时间知觉的重要组成部分，时距知觉是个体与外界环境交互的基础，对个体的生存和发展具有重要意义。例如，个体日常的讲话、音乐演奏、开车及体育运动等都需要时距知觉的参与。然而，个体主观感知的时距长度不仅取决于客观的物理时长，而且会受到多种因素的影响而发生扭曲(Matthews & Meck, 2016)。例如，反复呈现某一较长（或较短）的时距信息，个体会将后续中等时长的时距信息知觉为（相比无适应条件）更短（或更长），即产生时距知觉的适应后效（duration aftereffect）(Heron et al., 2012; Li, Yuan, & Huang, 2015)。这说明个体的感知历史是影响时距知觉的重要因素。

感知历史对时距知觉的影响不仅表现于长时程的感知适应（long-term adaptation）现象，而且也表现为序列依赖效应（serial dependence effect）。序列依赖效应是指先前试次对当前感知的影响，其反映了短时程的先前经验对个体后续感知加工的影响。先前试次所提供的信息是复杂、多维的。例如，在一般的知觉判断任务中，先前试次信息既包括先前刺激（previous

收稿日期：2022–10–27

* 国家自然科学基金青年科学基金项目（32000744）

王碧瑶和陈晨为共同第一作者

通讯作者：李宝林，E-mail：lblpsy@snnu.edu.cn

stimulus）信息，也包括先前决策（previous decision）信息。据此，序列依赖效应至少可以分为两类：（1）先前刺激信息对当前感知加工的影响，即刺激序列依赖效应（stimulus serial dependence effect）；（2）先前决策反应对当前感知加工的影响，即决策序列依赖效应（decisional serial dependence effect）。研究已发现序列依赖效应是一种普遍的现象，其不仅存在于对朝向(Fischer & Whitney, 2014; Pascucci et al., 2019)、数字(Michele & Joonkoo, 2018)和运动(Fischer et al., 2020)等较低水平的信息加工中，而且也存在于对高水平的面孔(Liberman et al., 2014)信息加工中。

近年来，时距知觉的序列依赖效应开始受到研究者的关注。例如，Wiener 等人(2014)采用时距二分任务（duration bisection task），要求被试将每次呈现的测试刺激的呈现时间分为两类（“较长”或“较短”），结果发现当前的时距判断会同时受到先前试次的刺激时距和决策反应信息的影响：当先前试次的刺激时距较长（或较短）时，被试倾向于判断当前刺激的呈现时间较短（或较长）；当先前试次的决策反应为较长（或较短）时，被试倾向于判断当前刺激的呈现时间较长（或较短）。这说明先前的刺激时距信息导致了时距知觉的排斥效应（repulsive effect），而先前的决策反应信息导致了时距知觉的吸引效应（attractive effect）。这与对其他知觉的研究结果类似，表明先前刺激和先前决策对当前感知加工的影响方向是相反的：先前刺激信息导致排斥效应，使当前知觉决策偏离先前刺激；先前决策信息导致吸引效应，使当前知觉决策倾向于重复先前决策(Feigin & Shalom-Sperber et al., 2021; Pascucci et al., 2019)。

然而，已有研究仅在听觉通道中发现了刺激序列依赖效应，而在视觉和听觉通道中均发现了决策序列依赖效应(Wehrman et al., 2020; Wiener et al., 2014)。这种结果可能与前人研究中使用的分析方法有关。具体来说，为了探讨先前刺激时距和决策反应对当前时距知觉的影响，前人的研究通常会根据先前刺激时距或决策反应的类型将当前的试次划分成不同类别。例如，为了探讨先前的决策反应对当前时距知觉的影响，前人研究会根据先前决策反应的类型，将当前的试次分为两类（分别对应于先前“较长”或“较短”的决策反应），然后再利用传统的心理物理法分别计算和比较这两类数据反映出的时距知觉表现差异(Wiener et al., 2014)。然而，一个突出的问题是先前的刺激时距长度和先前的决策反应密切相关：对于一个客观上较长的时距，被试更可能将其判断为较长，反之亦然。因此，这种数据分析方法并不能完全区分先前刺激时距和先前决策反应对后续时距知觉的独立影响（存在效应混淆或抵消的可能）。这在一定程度上解释了为什么在视觉通道不能观察到时距知觉的刺激序列依赖效应：刺激序列依赖效应和决策序列依赖效应的作用方向可能相反（排斥 vs. 吸引），且

在视觉通道中决策序列依赖效应更大，其减弱甚至抵消了刺激序列依赖效应。鉴于此，一项前期的研究利用概率选择模型（probabilistic choice model）将先前刺激时距和先前决策反应信息同时纳入模型对当前的时距知觉判断进行预测，结果发现无论在视觉还是听觉通道，先前刺激时距都导致了显著的排斥效应，而先前决策反应都导致了显著的吸引效应(Li et al., 2023)。这说明在视觉和听觉通道的时距知觉中均存在相似的刺激和决策序列依赖效应。

研究已表明排斥性的刺激序列依赖效应其实质与感知适应后效相似（sensory adaptation aftereffect；Moon & Kwon, 2022）。对时距知觉刺激序列依赖效应的前期研究也支持了这一观点。例如，研究发现时距知觉的刺激序列依赖效应具有通道特异性(Li et al., 2023)，这与由长时程时距适应（long-term duration adaptation）导致的排斥性的时距知觉适应后效相似(Heron et al., 2012)。然而，目前对视觉时距知觉刺激序列依赖效应产生的神经位置仍不清楚。虽然已有 fMRI 研究发现（长时程的）视觉时距知觉适应后效可能源于右侧顶叶(Hayashi & Ivry, 2020)，但这并不意味着刺激序列依赖效应也一定源于该脑区。相比长时程的感知适应导致的适应后效，刺激序列依赖效应反映了短时程的先前刺激对当前感知加工的影响，反映了一种快速适应机制。已有研究表明，适应时长是影响不同脑区神经适应的重要因素(Fang et al., 2005)。因此，长时适应机制和快速适应机制产生的神经机制可能并不相同。事实上，对听觉刺激序列依赖效应的研究发现其不受声音频率的制约(Li et al., 2023)，这与由长时程的时距适应导致的听觉时距知觉适应后效的特征相反(Li, Yuan, & Huang, 2015)，说明长时和快速的听觉时距知觉适应机制并不相同。综上，有必要进一步探讨视觉时距知觉刺激序列依赖效应产生的内在机制。

目前，对时距知觉决策序列依赖效应产生机制的解释也仍存争论。研究发现，时距知觉决策序列依赖效应在不同程度上受到感觉通道和通道内刺激特征（如拓扑形状和声音频率）的制约(Li et al., 2023)。鉴于决策是一种高水平的认知过程，该研究认为刺激特征对决策序列依赖效应的制约可能源于高级认知脑区的类别组织机制。然而，刺激特征对决策序列依赖效应的制约也符合早期感觉皮层信息加工的特点。因此，时距知觉的决策序列依赖效应也可能反映了先前决策信息通过反馈（feedback）机制对早期感觉皮层信息加工的影响。结合视觉环绕倾斜错觉（surround tilt illusion），Cicchini 等人(2021)对朝向知觉序列依赖效应的研究发现，当先前为错觉试次而当前为中性试次时，吸引性的序列依赖效应主要取决于先前知觉的（而非物理）朝向，即先前信息对当前知觉的影响包含了先前视觉错觉的影响；当先前为中性试次而当前为错觉试次时，该序列依赖效应主要取决于当前试次的物理（而非知觉）朝向，即先前信息与当前信息的交互发生于视觉错觉之前。这一结果模式表明先前信息能够直

接作用于早期视皮层低水平的感觉加工。此外，fMRI 研究也发现，在朝向知觉中吸引性的序列依赖效应能够被初级视觉皮层（primary visual cortex，V1）的神经活动所表征，且无论是行为还是神经上的序列依赖效应都具有一定的空间特异性(St John-Saaltink et al., 2016)。这再次说明吸引性的序列依赖效应的产生可能涉及早期视皮层。同时，考虑到不仅是高级脑区，早期视皮层（如 V1）在视觉时距加工中也具有重要作用(Shuler, 2016)，因此，值得思考的是早期视皮层是否参与了吸引性的时距知觉决策序列依赖效应的产生。

为揭示视觉时距知觉序列依赖效应产生的潜在神经位置，本研究拟探讨其空间迁移特征。认知神经科学的研究已表明，视觉神经元具有自身独特的感受野，且相邻神经元的感受野在视皮层也相邻；这种视皮层与视网膜空间点对点的映射关系，被称为视网膜位置的拓扑映射关系(Wandell et al., 2007)。此外，视觉通路上不同层级视皮层神经元的感受野并不相同，通常随着视觉层级的提高，相应神经元的感受野也逐渐增大(Amano et al., 2009; Harvey & Dumoulin, 2011)。例如，对于 5.5°的离心率，V1 的感受野通常小于 2°，V2 的感受野通常在 2°至 4°之间，V4 的感受野则通常在 4°至 6°之间，而较高级的后下颞区（posterior inferior temporal cortex，TEO）的感受野则通常大于 6°(Kastner et al., 2001)。此外，研究也发现一些高级的视觉区域（如腹侧顶内区，ventral intraparietal area，VIP）神经元的感受野并不是固定在视网膜空间的某一区域，而是对外部空间的某一固定区域反应，即表现出外部空间位置的拓扑映射关系(Duhamel et al., 1997)。不同视皮层感受野的特点为我们理解相应视觉表征所处的神经位置提供了重要的推断依据。利用这种特点，已有大量研究通过考察相应视觉效应的空间迁移特性来揭示该效应产生的潜在神经位置。例如，Knapen 等人(2010)发现，视网膜位置对倾斜后效（tilt aftereffect）具有重要的制约作用，进而推断出倾斜后效源于对视网膜位置敏感的早期视皮层（如 V1）；Burr 等人(2007)发现，由视觉运动适应导致的时距压缩效应取决于适应刺激与测试刺激外部空间（而非视网膜空间）位置的一致性，说明该效应产生于较高级的脑区（如顶叶），而非早期视皮层。据此，对时距知觉序列依赖效应空间迁移性的探讨有助于进一步理解其产生的潜在神经位置。可以推测，如果时距知觉序列依赖效应产生于具有严格视网膜位置拓扑映射关系的早期视皮层（如 V1），那么其将表现出基于视网膜位置的空间特异性。

此外，对时距知觉序列依赖效应空间迁移性的探讨也具有一定的现实意义。已有研究仅探讨了单一空间背景下的时距知觉序列依赖效应(Li et al., 2023; Wehrman et al., 2020; Wiener et al., 2014)。这在一定程度上限制了研究结果的生态效度。个体生活所处的真实环境具有丰富多样性，同一客体（由于客体运动以及观察者运动）会不断变换位置。因此，对时距知觉

序列依赖效应空间迁移性的探讨，有利于我们理解在较复杂的真实环境中先前时距知觉经验对后续时距知觉的影响。以往对序列依赖效应空间特性的探究主要集中在对事物空间属性的知觉方面。已有研究表明，朝向知觉(Fischer & Whitney, 2014)和图像识别(Manassi et al., 2019)的序列依赖效应都受到空间位置的调节。然而，与空间信息不同，时距信息具有高度的抽象性，且个体没有专门加工时距信息的感受器。相较于空间信息，个体对时距信息的加工存在独特的认知神经机制(Merchant et al., 2013)；且以往对空间属性知觉的序列依赖效应空间迁移性的探讨并没有严格区分刺激和决策的影响(Fischer & Whitney, 2014; Manassi et al., 2019)。因此，有必要进一步探讨时距知觉刺激和决策序列依赖效应的空间迁移性。

综上所述，本研究采用时距二分任务，结合概率选择模型，通过三个实验探讨了视觉时距知觉序列依赖效应的空间特异性/迁移性。具体来说，实验 1 探讨了时距知觉序列依赖效应在中央和外周视野的迁移性。实验中测试刺激随机呈现在被试的中央和外周视野（10°），被试需要判断当前的刺激呈现时间比先前学习阶段的参照刺激“较长”还是“较短”。不同于实验 1，实验 2 将刺激随机呈现在左、右视野（5°），进一步探讨了时距知觉序列依赖效应跨视野的迁移性。最后，实验 3 通过系统地改变注视点和刺激呈现的位置，有效分离了基于外部空间的（Spatiotopic）位置和基于视网膜空间的（Retinotopic）位置，进一步揭示了时距知觉序列依赖效应空间迁移性的特征。结果发现时距知觉的刺激序列依赖效应和决策序列依赖效应都能够在不同的空间位置间迁移，但是这两种效应迁移的程度不同；且这两种效应的空间迁移性不受空间类型（外部空间 vs. 视网膜空间）的调节。

2 实验 1：时距知觉序列依赖效应在中央和外周视野间的迁移

实验 1 探讨了时距知觉序列依赖效应在中央和外周视野的表现及其迁移性。中央视野和外周视野的视觉加工能力在众多视觉任务中都存在明显的差异(Rosenholtz, 2016; Strasburger et al., 2011)。fMRI 研究也表明，不同视觉离心率的刺激在早期视皮层中对应着不同的神经表征位置(Amano et al., 2009)，且随着离心率的增加，皮层放大率（cortex magnification factor，CMF）逐渐降低(Qiu et al., 2006)。这说明，相比外周视野，中央视野具有更加重要的功能。据此，如果时距知觉序列依赖效应源于早期视皮层的加工，那么其在中央和外周视野将有不同的表现，且不能在中央和外周视野间相互迁移。

2.1 方法

2.1.1 被试

根据 G*Power3.1 的计算，对于本实验适用的 2×2 的重复测量方差分析，在显著性水平

α = 0.05 且中等效应（f = 0.25）的条件下，达到 80%的统计检验力所需的样本量为 24 人(Faul et al., 2007)。该样本量与前人相关研究的样本量相当(Li et al., 2023; Wehrman et al., 2020)。因此，实验 1 共对 24 名在校大学生（22 名女性；平均年龄 M = 19.5 岁，SD = 1.74 岁）进行了测试。所有被试均是右利手，视力或矫正视力正常，实验结束前被试对实验目的不知情。该研究经过伦理委员会审查，被试在实验开始前均签署了知情同意书，实验结束后给予被试一定的报酬。

2.1.2 刺激和仪器

本实验是一个视觉测试。视觉刺激是一个呈现在 CRT 显示器（刷新频率为 85 Hz，屏幕分辨率为 1280×960 pixels）左侧或右侧 5°的白色光斑（Gaussian blob, SD = 0.5，Michelson contrast = 0.7）。在整个实验过程中，被试端坐于电脑屏幕前，距离显示器约 58 cm，头部由颌托固定。刺激的呈现及数据收集由基于 MATLAB 平台的 Psychophysics Toolbox 编制的实验程序实现(Brainard, 1997; Pelli, 1997)。

2.1.3 设计

采用 2（当前刺激位置：中央视野 vs. 外周视野）×2（位置一致性：一致 vs. 不一致）的被试内设计。因变量为被试判断当前测试刺激的呈现时间较先前的参照刺激长的比例。

当前刺激位置是指实验中当前试次的测试刺激出现的位置。具体来说，当前测试刺激既可能出现在被试的中央视野，也可能出现在被试的外周视野。位置一致性是指当前试次和先前试次的测试刺激出现的位置是否一致：当前试次和先前试次的测试刺激都出现在中央视野或者都出现在外周视野时为位置一致条件；当前试次的测试刺激出现在中央视野（或外周视野），先前试次的测试刺激出现在外周视野（或中央视野）时为位置不一致条件。

2.1.4 程序

该实验采用简化的时距二分任务(Wiener et al., 2014)（图 1A）。在该任务中，每个试次首先呈现 500 ms 的注视点，接下来在注视点或注视点右侧 10°的位置随机呈现一个视觉测试刺激。测试刺激的呈现时间为 300~900 ms 范围中以等对数步长变化的五个时距之一（即 300、395、520、684 或 900 ms）。当刺激消失后，要求被试在保证正确率的条件下，尽可能快地进行按键反应，即判断测试刺激的呈现时间相比记忆中的参照刺激（见下文）“较长”还是“较短”。被试的按键反应方式在被试间进行平衡：一半被试在认为测试刺激的呈现时间“较长”时，用左手食指按下“F”键，认为测试刺激的呈现时间“较短”时，用右手食指按下“J”键；另一半被试的按键反应与此相反。本实验将注视点设置在屏幕中央左侧 5°的位置，要求被试在实验全程注视该点。实验中刺激的呈现顺序由伪随机的 10^3 de Bruijn 序

列决定(Brimijoin & O'Neill, 2010)，共计 1000 个试次，每种时距的刺激呈现 200 次（其中每种位置条件下的刺激呈现 100 次），被试每完成 250 个试次后进行一次短暂的休息（休息时长小于 30 s）。在正式实验前，被试需要完成一个学习任务。在学习任务中，刺激（即参照刺激）的呈现时间为所有测试时距的几何平均值（即 520 ms），其交替呈现于注视点和注视点右侧 10°的位置各 5 次。该任务中被试仅需记住参照刺激的呈现时间，无需反应。如果被试认为自己尚未记住参照刺激的呈现时间，则可以主动选择再次进行参照刺激的学习，该阶段可重复多次，直到被试认为自己掌握了该时长，方可进入正式测试阶段。在后续的正式测试阶段，被试需要根据记忆中参照刺激的呈现时间对测试刺激的呈现时间进行判断。

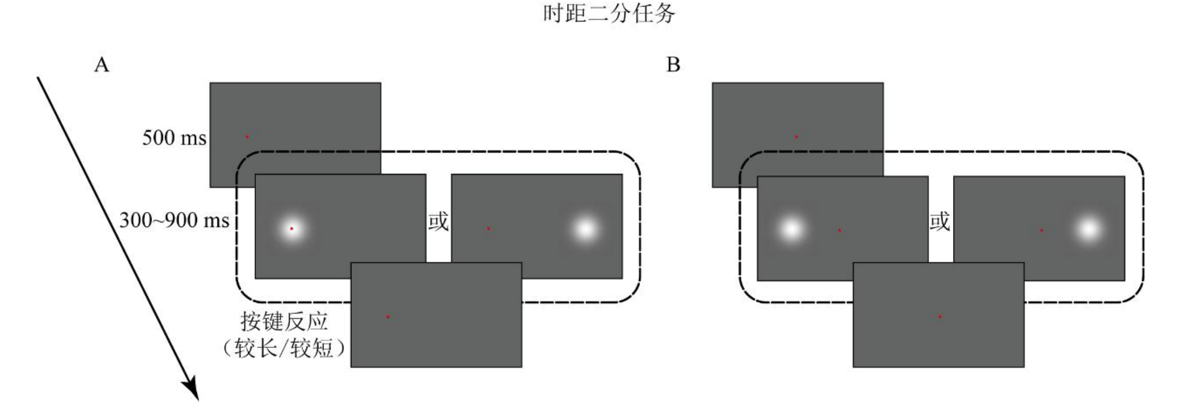


图 1 实验流程图。（A）实验 1 正式测试的流程：首先在距屏幕中央左侧 5°的位置呈现 500 ms 的红色注视点，要求被试在实验全程注视该点，接着随机在注视点或注视点右侧 10°位置呈现一个时长为 300~900 ms 的测试刺激，在测试刺激消失后被试需判断测试刺激的呈现时间相比记忆中的参照刺激的呈现时间“较长”还是“较短”，并进行按键反应。（B）实验 2 的测试流程同实验 1，不同之处仅在于注视点呈现在屏幕中央，此时测试刺激随机呈现在注视点左侧或右侧 5°的位置。

2.1.5 数据分析与统计

首先删除了每名被试反应时超过其中数（median）3 个绝对中位差（median absolute deviations, MADs）的试次(Leys et al., 2013)（共删除了 6.9%的试次）。接着，为了考察刺激位置对时距知觉的影响，我们计算出每名被试在每种时距和位置条件下判断测试刺激呈现时间“较长”的比例，并使用基于 MATLAB 的 psignifit Toolbox 对数据进行累积高斯分布拟合（见 https://github.com/wichmann-lab/psignifit/wiki/; Schutt et al., 2016），得到每个被试在每种位置条件下时距辨别的主观相等点（point of subjective equality，PSE；即被试做出“较长”判断的比例为 50%的点所对应的时距，对应着累积高斯分布的均值）和最小可觉差（just noticeable difference，JND；即被试判断“较长”的比例为 75%和 25%时所对应的时距距离的一半，其反映了个体的时间感受性，数值越小表明个体的时间感受性越高）。在此基础上，我们采用配对样本 t 检验分别考察了刺激位置对个体时距知觉的准确性（由于实验中参照刺

激的呈现时间为 520 ms，因此我们采用 PSE 与 520 差值的绝对值衡量时距知觉的准确性，即|PSE–520|；绝对值越小代表准确性越高）和感受性（JND）的影响。

前人研究通常通过比较不同条件下的 PSE 来衡量时距知觉的序列依赖效应(Wehrman et al., 2020; Wiener et al., 2014)。例如，Wiener 等人(2014)为了计算时距知觉的刺激序列依赖效应，他们首先将实验试次划分为七种类型，分别对应着先前试次的七种刺激时距，然后以七种试次类型下 PSE 的线性拟合的斜率作为刺激序列依赖效应的效应量；为了计算决策序列依赖效应，实验试次被划分为两种类型，分别对应着先前试次的两种决策反应（“较长”或“较短”），然后通过计算先前“较短”反应条件和先前“较长”反应条件下的 PSE 差值来衡量决策序列依赖效应的效应量。然而，对于一个客观上较长（或较短）的测试刺激，被试更可能将它判断为“较长”（或“较短”），即被试的反应和实际的刺激时距间存在明显的相关。因此，这种分析方法无法完全将先前试次的刺激时距和决策反应对当前时距知觉的影响分离。鉴于此，本研究采用概率选择模型进行数据分析。该模型能够有效分离先前试次的不同信息对当前试次知觉决策的影响，且已广泛应用于不同知觉现象的序列依赖效应研究中(Feigin & Baror et al., 2021; Feigin & Shalom-Sperber et al., 2021)。具体来说，该模型通过二项逻辑回归（binomial logistic regression）函数预测在当前试次（t）中，被试将测试刺激判断为“较长”的比例：

$$p_t(L) = \frac{1}{1+e^{-z_t}}$$

（1）

其中z_t是可能影响当前知觉决策的四个预测变量的线性组合（见图 2）：

$$z_t = \beta_0 + \beta_{curr_stimulus} \times s_t + \beta_{prev_stimulus} \times s_{t-1} + \beta_{prev_choice} \times c_{t-1}$$

（2）

在公式中，β_0表示被试做出“较长”或“较短”决策的基线偏差（bias）；s_t是当前刺激的时距，$\beta_{curr_stimulus}$是它的权重；s_{t-1}是前一试次刺激的时距，$\beta_{prev_stimulus}$是其权重；c_{t-1}是前一试次的决策反应，β_{prev_choice}是该参数的权重。在本研究中，决策反应共有 2 类（判断为“较长”或“较短”，其编码分别为+1 和–1），然而刺激时距

（300~900 ms）却是一种连续变量，且以对数步长变化。为了使这些参数具有可比性，我们参照已有研究(Feigin & Baror et al., 2021; Feigin & Shalom-Sperber et al., 2021)，将刺激时距转换为对数形式，并通过均方根（root-mean-square, RMS）对其进行标准化。通过这种转换后，刺激时距和决策反应这两个参数的 RMS 具有一致性，即都等于 1。

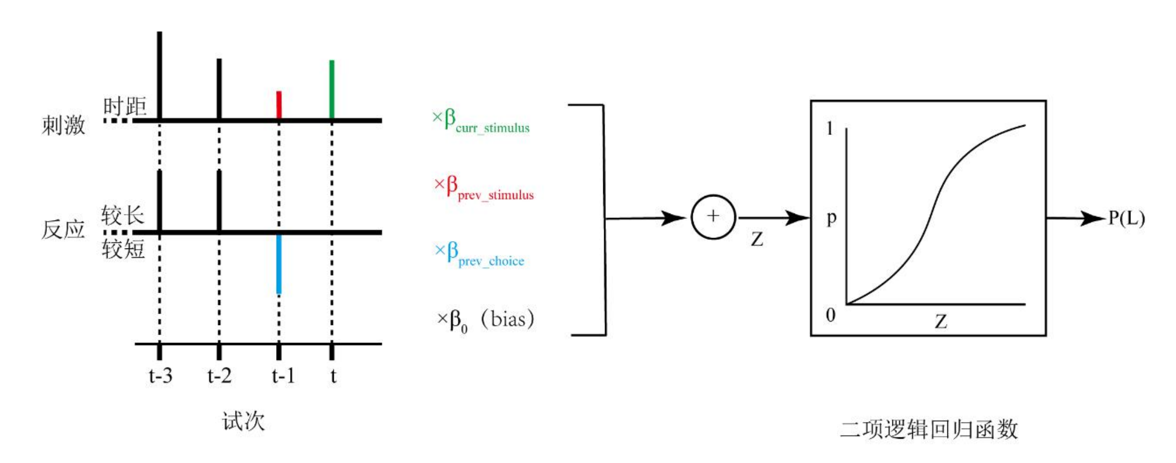


图 2 概率选择模型示意图。对某个被试当前的知觉决策而言，它由四种因素共同决定，即基线偏差（β_0）、当前试次的刺激时距信息（$\beta_{curr_stimulus}$）、先前试次的刺激时距信息（$\beta_{prev_stimulus}$）、先前试次的决策反应信息（β_{prev_choice}）。图中刺激和反应轴上的竖线条分别表示刺激时距和决策反应。绿色线条表示当前试次（t）的刺激时距信息，红色线条表示紧邻的前一试次（t–1）的刺激时距信息，蓝色线条表示紧邻的前一试次的决策反应信息。该模型中个体当前的时距知觉决策反应概率（P(L)）由这四种因素通过二项逻辑回归函数的方式决定。

为了衡量四种因素对当前知觉决策的影响程度，我们建立了四种比较模型。这些模型都基于相同的逻辑回归函数，不同之处仅在于它们的参数类型。具体来说M_0（“no-history”模型）是最基本的模型，该模型假设当前时距知觉决策仅由基线偏差和当前试次的刺激时距信息决定（即公式 2 中$\beta_{prev_stimulus}$和β_{prev_choice}设置为 0）；M_1（“stimulus-history”模型）假设当前时距知觉决策由基线偏差、当前试次的刺激时距信息和先前试次的刺激时距信息决定（即公式 2 中β_{prev_choice}设置为 0）；M_2（“choice-history”模型）假设当前时距知觉决策由基线偏差、当前试次的刺激时距信息和先前试次的决策反应信息决定（即公式 2 中$\beta_{prev_stimulus}$设置为 0）；M_3（“stimulus and choice history”模型）假设当前时距知觉决策由基线偏差、当前试次的刺激时距信息、先前试次的刺激时距信息以及先前试次的决策反应信息四者共同决定(即公式 2 中的所有参数系数都不为 0)。

利用赤池信息量（Akaike information criterion, AIC）进行模型比较：

$$\mathrm{AIC} = -2\log(\mathrm{L}) + 2k$$

（3）

其中，k 代表模型中所包含的参数数量，L 是它的最大似然估计。在计算出每个被试每种模型的 AIC 后，进一步分别计算出三种涉及先前试次信息的模型（M_1、M_2、M_3）与基线模型（M_0）的 AIC 的差值（ΔAIC）：

$$\Delta\mathrm{AIC} = AIC_{M_i} - AIC_{M_0}$$

（4）

由于 AIC 的值越小表明模型越好，因此ΔAIC 的绝对值越大，表明证据越支持模型比较中 AIC 值小的模型。具体来说，当ΔAIC 的绝对值为 2~6、6~10 或者大于 10 时，分别表明存在肯定的，强烈的或者非常强烈的证据支持 AIC 值小的模型(Kass & Raftery, 1995)。

为了计算不同条件下先前试次的刺激时距和决策反应信息对当前时距知觉决策的影响，我们将试次划分成四组，它们分别是：前一试次刺激呈现在中央视野，当前试次刺激也呈现在中央视野（CC）；前一试次刺激呈现在外周视野，当前试次刺激也呈现在外周视野（PP）；前一试次刺激呈现在外周视野，当前试次刺激呈现在中央视野（PC）；前一试次刺激呈现在中央视野，当前试次刺激呈现在外周视野（CP）。对上述四组数据分别采用概率选择模型进行分析。因此每组数据都将获得四个模型系数（β_0、$\beta_{curr_stimulus}$、$\beta_{prev_stimulus}$和β_{prev_choice}）。其中，$\beta_{prev_stimulus}$和β_{prev_choice}分别反映了先前试次的刺激时距和决策反应信息对当前时距知觉决策的影响，是本研究中重点关注的模型系数。另外两个模型系数（β_0和$\beta_{curr_stimulus}$）分别反映了个体知觉决策的基线偏差和当前刺激时距信息对当前时距知觉决策的影响。由于它们并非本研究关注的重点，因此仅在附录中呈现了这两个模型系数的结果（见附录，图 S1）。对于每个模型系数，我们首先采用单样本 *t* 检验检测其是否与 0 有显著差异。然后，采用 2（当前刺激位置：中央视野 vs. 外周视野）×2（位置一致性：一致 vs. 不一致）的重复测量方差分析分别考察了刺激位置及其一致性对时距知觉的刺激和决策序列依赖效应及其空间迁移的影响。

2.2 结果

图 3A 展示了实验 1 中一名具有代表性的被试在不同空间位置条件下时距知觉的心理测量函数曲线。在群体水平，配对样本 *t* 检验发现，当刺激呈现在中央视野时，个体时距知觉的准确性（|PSE–520|）要显著高于刺激呈现在外周视野时（59.68 ms vs. 130.37 ms, $t(23) = –5.21$, $p < 0.001$, Cohen’s $d = –1.06$, 95% CI [–98.72, –42.64]）（图 3B）。此外，结果也发现中央视野条件下的 JND 显著小于外周视野条件下的 JND（114.82 ms vs. 137.67 ms, $t(23) = 2.99$, $p = 0.007$, Cohen’s $d = 0.61$, 95% CI [7.02, 38.70]）（图 3C）。这说明当刺激呈现在视野中央时被试的时间感受性更高，对刺激时距信息的变化更加敏感。上述结果证实了刺激的呈现位置对时距知觉具有重要影响。

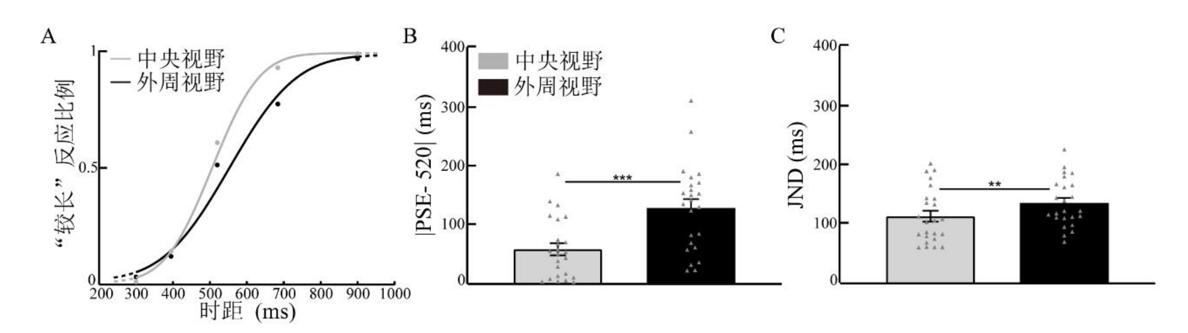


图 3 实验 1 心理测量结果。（A）一名代表性被试在不同位置条件下（中央视野 vs. 外周视野）的心理测量函数（累积高斯函数）曲线。横坐标为测试刺激的呈现时间，纵坐标为被试判断测试刺激呈现时间“较长”的比例。图中灰色曲线代表中央视野，黑色曲线代表外周视野；灰色与黑色实心圆点分别代表不同视野下该名被试在不同时距下的“较长”反应比例。（B）不同位置条件下时距知觉的准确性（|PSE–520|）；（C）不同位置条件下时距知觉的感受性（JND）。图中灰色条形图代表中央视野，黑色条形图代表外周视野；灰色三角形代表每种条件下每名被试的数据点。误差线代表每种条件下平均值的标准误差；***$p < 0.001$，**$p < 0.01$。

为了区分先前试次的刺激时距和先前试次的决策反应对当前时距知觉的影响，单样本 *t* 检验分别考察了 $\beta_{prev_stimulus}$ 和 β_{prev_choice} 系数与 0 的差异。结果发现在四种条件下 $\beta_{prev_stimulus}$ 都显著小于 0（CC: $t(23) = –4.88$, $p < 0.001$, Cohen’s $d = –1.00$, 95% CI [–1.28, –0.52]; PP: $t(23) = –4.61$, $p < 0.001$, Cohen’s $d = –0.94$, 95% CI [–0.83, –0.32]; PC: $t(23) = –5.57$, $p < 0.001$, Cohen’s $d = –1.14$, 95% CI [–0.96, –0.44]; CP: $t(23) = –3.71$, $p = 0.001$, Cohen’s $d = –0.76$, 95% CI [–0.87, –0.25]）（图 4A）。此外，2（当前刺激位置：中央视野 vs. 外周视野）×2（位置一致性：一致 vs. 不一致）的重复测量方差分

析发现，当前刺激位置的主效应边缘显著（$F(1, 23) = 3.93, p = 0.060, \eta_p^2 = 0.15$）；位置一致性的主效应（$F(1, 23) = 0.69, p = 0.415$）以及它们的交互效应（$F(1, 23) = 0.83, p = 0.372$）不显著。这些结果一方面说明先前试次的刺激时距信息对当前时距知觉决策具有显著影响，即先前试次的刺激时距导致了时距知觉的排斥效应，使当前的时距知觉决策偏离了先前试次的刺激时距；另一方面也说明时距知觉的刺激序列依赖效应不受刺激空间位置的制约，能够在中央和外周视野相互迁移。同时，当刺激位于外周视野时，相比中央视野，刺激序列依赖效应倾向于减小，这说明外周视野时距加工的劣势也表现在刺激序列依赖效应中。

其次，对β_{prev_choice}系数的单样本 t 检验发现，在四种条件下β_{prev_choice}的均值都显著大于 0（CC: $t(23) = 12.82, p < 0.001$, Cohen's $d = 2.62$, 95% CI [1.06, 1.47]; PP: $t(23) = 17.49, p < 0.001$, Cohen's $d = 3.57$, 95% CI [1.18, 1.50]; PC: $t(23) = 3.08, p = 0.005$, Cohen's $d = 0.63$, 95% CI [0.09, 0.47]; CP: $t(23) = 4.22, p < 0.001$, Cohen's $d = 0.86$, 95% CI [0.15, 0.45]）（图 4B）。重复测量方差分析发现，位置一致性的主效应显著（$F(1, 23) = 198.87, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.90$），表现为当先前试次刺激的位置与当前试次刺激的位置保持一致时，β_{prev_choice}系数显著大于不一致条件；当前刺激位置的主效应（$F(1, 23) = 0.54, p = 0.468$）和它们的交互效应（$F(1, 23) = 0.34, p = 0.567$）不显著。这些结果表明先前试次的决策反应信息导致了吸引效应，使当前的知觉决策偏向于先前的决策反应。这种效应虽然能够在不同的条件下出现，但是刺激位置的一致性对这一效应的大小具有显著的调节作用。这说明这种效应在不同位置间的迁移是一种不完全的迁移。

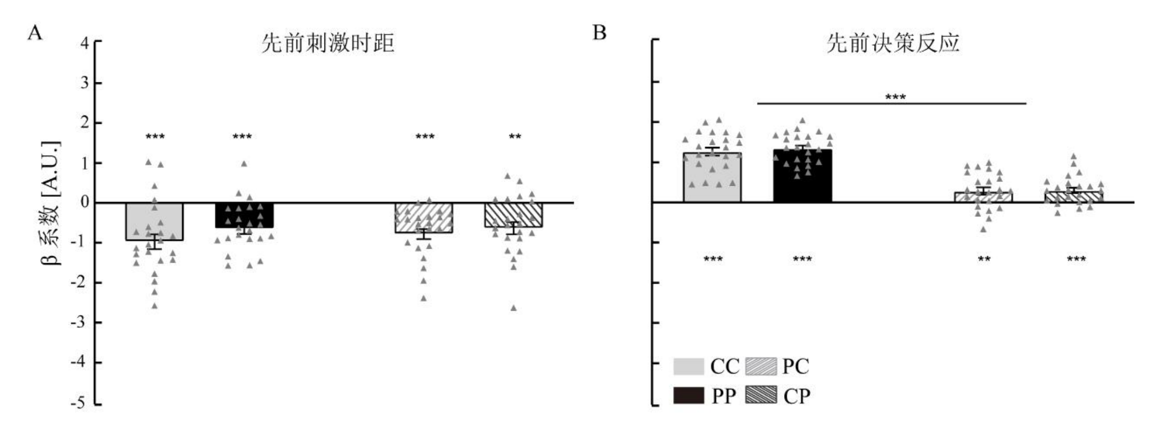


图 4 实验 1 模型中基于先前刺激时距（A）和决策反应（B）的β系数在不同条件下的大小。灰色实心条形图 CC 代表前一试次呈现在中央视野，当前试次也呈现在中央视野；黑色实心条形图 PP 代表前一试次呈现在外周视野，当前试次也呈现在外周视野；浅色条纹条形图 PC 代表前一试次呈现在外周视野，当前试次呈现在中央视野；深色条纹条形图 CP 代表前一试次呈现在中

央视野，当前试次呈现在外周视野。图中灰色三角形代表每种条件下每名被试的数据点；误差线代表标准误差；*** $p < 0.001$，** $p < 0.01$。

最后，模型比较的结果表明，在位置一致条件下ΔAIC 的值都明显小于零：M_3表现最佳（CC: $\Delta AIC_{M3} = -27.05$; PP: $\Delta AIC_{M3} = -28.81$），其次是M_2（CC: $\Delta AIC_{M2} = -24.49$; PP: $\Delta AIC_{M2} = -28.23$），最后是M_1（CC: $\Delta AIC_{M1} = -4.56$; PP: $\Delta AIC_{M1} = -6.86$）。这说明将先前试次的刺激时距和决策反应信息同时纳入模型时能够更好地解释当前的知觉决策，进一步说明先前的试次信息对当前的知觉决策有重要影响。在位置不一致条件下，虽然ΔAIC 的值都小于零（PC: $\Delta AIC_{M1} = -1.04$, $\Delta AIC_{M2} = -1.61$, $\Delta AIC_{M3} = -2.58$; CP: $\Delta AIC_{M1} = -0.88$, $\Delta AIC_{M2} = -0.90$, $\Delta AIC_{M3} = -1.69$），但是其量值相对较小（ΔAIC_{M3}接近于-2）。这说明相对于位置一致条件而言，位置不一致条件下先前试次信息对当前知觉决策影响的重要性降低（图 5A）。

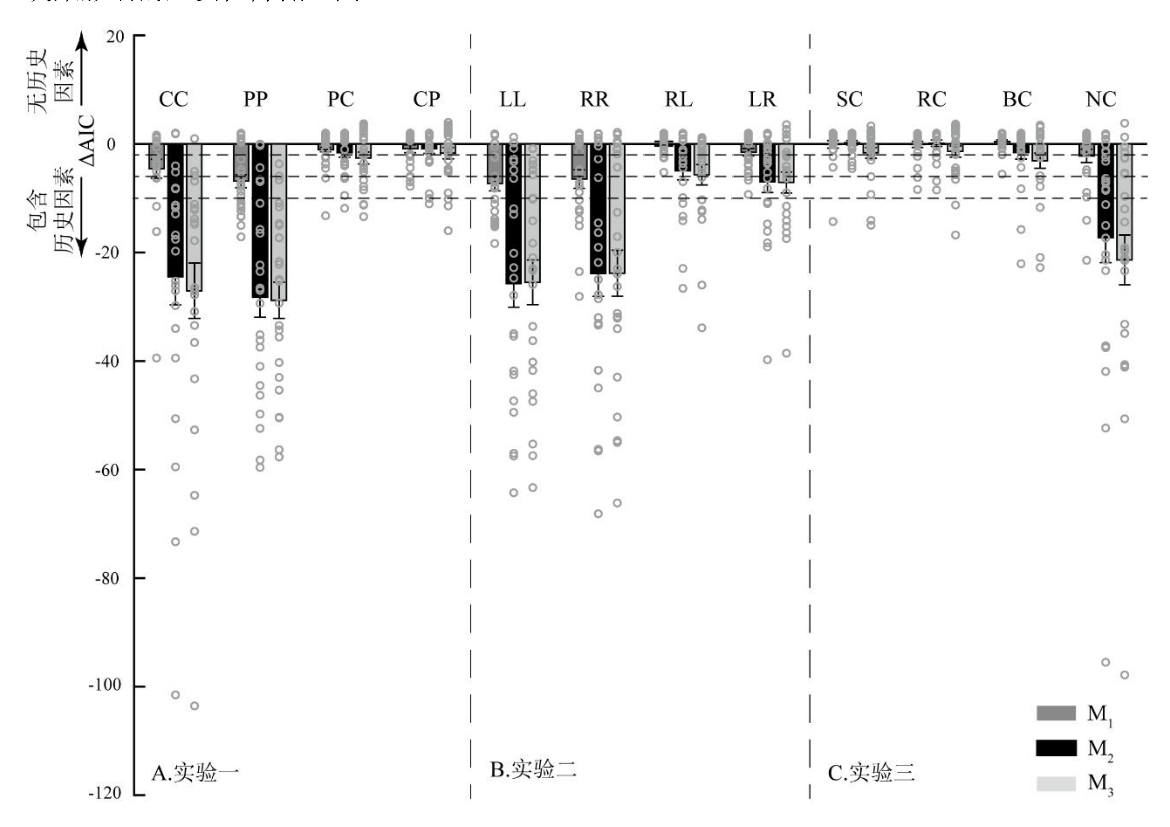


图 5 实验 1、实验 2 和实验 3 在不同条件下的模型比较结果。横坐标为不同的实验条件，纵坐标为包含历史因素模型（深灰色条形图M_1代表“stimulus-history”模型，黑色条形图M_2代表“choice-history”模型，浅灰色条形图M_3代表“stimulus and choice history”模型）与无历史因素模型（M_0）的 AIC 差值（ΔAIC）。平行于横坐标的虚线作为ΔAIC = –10（下），ΔAIC = –6（中）和ΔAIC = –2（上）的标记。当ΔAIC 的绝对量值在 2~6，6~10，或大于 10 时，分别表明存在肯定的，强烈的或非常强的证据支持 AIC 值小的模型。灰色空心圆代表每种条件下每名被试的ΔAIC；误差线代表标准误差。

3 实验 2：时距知觉序列依赖效应跨视野的迁移性

实验 1 发现时距知觉的刺激和决策序列依赖效应能够产生于中央和外周视野，但只有刺激序列依赖效应能够在中央和外周视野间完全迁移，而决策序列依赖效应则仅能在不同的视野间部分迁移。这似乎说明时距知觉的刺激序列依赖效应源于较高级的视觉加工脑区，而决策序列依赖效应则可能在一定程度上受到早期视皮层信息加工的制约。为了进一步验证这一观点，实验 2 探讨了时距知觉序列依赖效应跨视野半球的迁移情况。由于脑的左右半球在解剖上的分离，视觉信息跨半球的迁移在不同视皮层的信息加工中表现不同：对于早期视皮层（如 V1），其主要接收对侧视野的视觉信息，而对于较高水平的视觉加工区域，其感受野则表现出更大的跨视野半球特征(Amano et al., 2009; Harvey & Dumoulin, 2011)。因此，对时距知觉序列依赖效应跨视野半球迁移性的探讨能够进一步揭示其产生的潜在神经位置：如果时距知觉序列依赖效应源于早期视皮层的信息加工，那么其将表现出视野半球的特异性；反之，则能够在不同的视野半球间相互迁移。

3.1 方法

3.1.1 被试

24 名未参加实验 1 的在校大学生自愿参与并完成了实验 2。他们均是右利手，且视力或矫正视力正常，实验结束前被试对实验目的不知情。其中，由于 1 名被试的表现过差（即 PSE 超出测试时距范围），因此在正式数据分析中将其数据剔除，最终实验 2 的样本包括 23 名被试（17 名女性；平均年龄：19.3 岁，*SD* = 1.96 岁）。被试在实验开始前均签署了知情同意书，实验结束后给予被试一定的报酬。

3.1.2 刺激和仪器

实验仪器及刺激同实验 1。

3.1.3 设计

采用 2（当前刺激位置：左侧 vs. 右侧）×2（位置一致性：一致 vs. 不一致）的被试内设计。因变量为被试判断当前测试刺激的呈现时间较先前的参照刺激长的比例。

当前刺激位置是指实验中当前试次的测试刺激出现的位置，以中央注视点为基准，分为左侧视野和右侧视野。位置一致性是指当前试次和先前试次的测试刺激出现的位置是否一致：当前试次和先前试次的测试刺激都出现在左侧视野或者都出现在右侧视野时为位置一致条件；当前试次的测试刺激出现在左侧视野（或右侧视野），先前试次的测试刺激出现在右侧视野（或左侧视野）时为位置不一致条件。

3.1.4 程序

实验程序与实验 1 类似，不同之处在于：在实验 2 的学习和测试阶段，视觉注视点呈现

在屏幕中央，而视觉刺激呈现在距离注视点 5°的左右两侧（图 1B）。实验中要求被试紧盯屏幕中央的注视点。

3.1.5 数据分析

同实验 1，首先删除了每名被试反应时超过其反应时中数 3 个绝对中位差的试次(Leys et al., 2013)，该标准共删除了 6.5%的试次；随后求出每名被试在每种条件下的|PSE–520|和 JND，计算出相应位置条件下的时距知觉准确性和感受性。为了探讨不同条件下的时距知觉序列依赖效应，实验试次被划分为四组：前一试次刺激呈现在左侧视野，当前试次刺激也呈现在左侧视野（LL）；前一试次刺激呈现在右侧视野，当前试次刺激也呈现在右侧视野（RR）；前一试次刺激呈现在右侧视野，当前试次刺激呈现在左侧视野（RL）；前一试次刺激呈现在左侧视野，当前试次刺激呈现在右侧视野（LR）。后续概率选择模型分析和统计同实验 1。

3.2 结果

图 6A 展示了实验 2 中一名具有代表性的被试在不同位置条件下的时距知觉心理测量函数曲线。配对样本 *t* 检验发现，时距知觉的准确性（|PSE–520|）（64.01 ms vs. 56.81 ms, $t(22) = 0.87$, $p = 0.396$, 95% CI [–10.05, 24.45]）和感受性（JND）（115.64 ms vs. 117.54 ms, $t(22) = –0.34$, $p = 0.735$, 95% CI [–13.34, 9.55]）在刺激呈现于左侧和右侧条件下都没有显著差异（图 6B 和 6C）。这说明个体的时距知觉在左右视野没有差异。

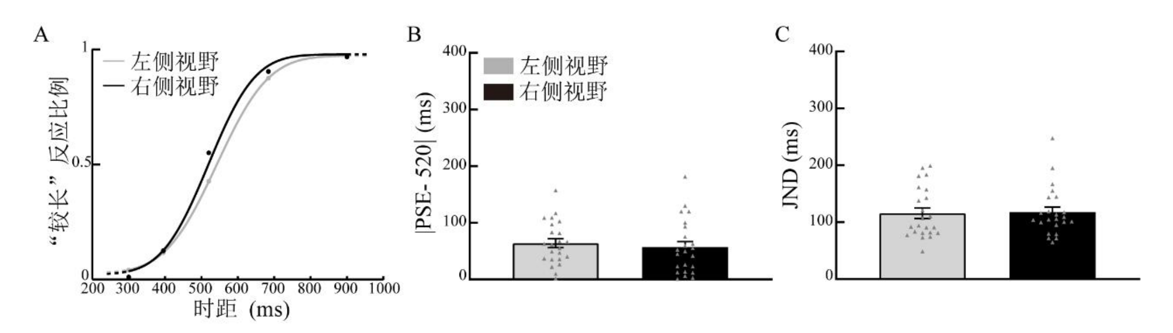


图 6 实验 2 心理测量结果。(A）一名代表性被试在不同位置条件下（左侧视野 vs. 右侧视野）的心理测量函数（累积高斯函数）曲线。横坐标为测试刺激的呈现时间，纵坐标为被试判断测试刺激呈现时间“较长”的比例。图中灰色曲线代表左侧视野，黑色曲线代表右侧视野；灰色与黑色实心圆点分别代表不同视野下该名被试在不同时距下的“较长”反应比例。(B）不同位置条件下时距知觉的准确性（|PSE–520|)；(C）不同位置条件下时距知觉的感受性（JND)。图中灰色条形图代表左侧视野，黑色条形图代表右侧视野；灰色三角形代表每种条件下每名被试的数据点。误差线代表每种条件下平均值的标准误差。

对$\beta_{prev_stimulus}$系数进行单样本 *t* 检验。结果发现，在四种条件下，$\beta_{prev_stimulus}$都显著小于 0（LL: $t(22) = –2.48$, $p = 0.021$, Cohen’s $d = –0.52$, 95% CI [–0.65, –0.06]; RR: $t(22) = –2.43$, $p = 0.024$, Cohen’s $d =$

–0.51, 95% CI [–0.67, –0.05]; RL: $t(22) = –3.17$, $p = 0.004$, Cohen's $d = –0.66$, 95% CI [–0.84, –0.17]; LR: $t(22) = –2.97$, $p = 0.007$, Cohen's $d = –0.62$, 95% CI [–0.81, –0.14]）。2（当前刺激位置：左侧 vs. 右侧）×2（位置一致性：一致 vs. 不一致）的重复测量方差分析发现，当前刺激位置（$F(1, 22) = 0.01$, $p = 0.941$）和位置一致性（$F(1, 22) = 0.96$, $p = 0.339$）的主效应以及它们的交互效应（$F(1, 22) = 0.02$, $p = 0.878$）都不显著（图 7A）。这些结果进一步表明时距知觉的刺激序列依赖效应能够出现在外周视野，且不受刺激空间位置的制约，能够在左右视野间互相迁移。

单样本 t 检验也表明β_{prev_choice}在四种条件下均显著大于 0（LL: $t(22) = 11.50$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 2.40$, 95% CI [0.92, 1.33]; RR: $t(22) = 8.49$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.77$, 95% CI [0.79, 1.30]; RL: $t(22) = 4.50$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.94$, 95% CI [0.28, 0.77]; LR: $t(22) = 4.66$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.97$, 95% CI [0.30, 0.78]）。两因素重复测量方差分析发现，位置一致性的主效应显著（$F(1, 22) = 68.36$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.76$），即位置一致条件下的β_{prev_choice}显著大于位置不一致条件；当前刺激位置的主效应（$F(1, 22) = 0.26$, $p = 0.616$）和它们的交互效应（$F(1, 22) = 0.60$, $p = 0.449$）均不显著（图 7B）。这些结果说明时距知觉的决策序列依赖效应只能够在左右视野间进行部分的迁移。

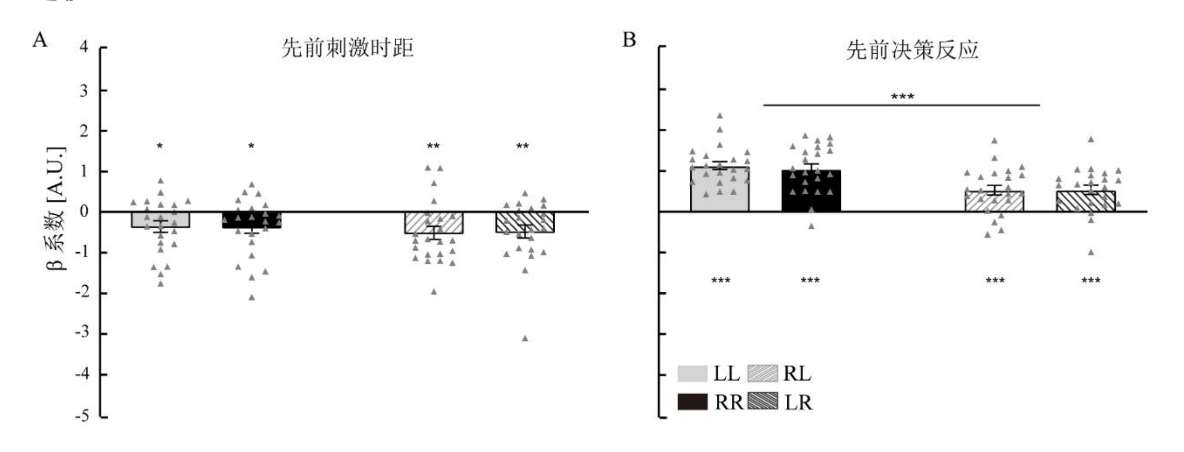


图 7 实验 2 模型中基于先前刺激时距（A）和决策反应（B）的β系数在不同条件下的大小。灰色实心条形图 LL 代表前一试次呈现在左侧视野，当前试次也呈现在左侧视野；黑色实心条形图 RR 代表前一试次呈现在右侧视野，当前试次也呈现在右侧视野；浅色条纹条形图 RL 代表前一试次呈现在右侧视野，当前试次呈现在左侧视野；深色条纹条形图 LR 代表前一试次呈现在左侧视野，当前试次呈现在右侧视野。图中灰色三角形代表每种条件下每名被试的数据点；误差线代表标准误差；***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$。

实验 2 模型比较的结果发现，在位置一致条件下 ΔAIC 的值都明显小于零

（LL: ΔAIC_{M1} = –7.30, ΔAIC_{M2} = –25.74, ΔAIC_{M3} = –25.48; RR: ΔAIC_{M1} = –6.46, ΔAIC_{M2}= –23.83, ΔAIC_{M3}= –23.81），表明包含先前试次（刺激时距与决策反应）信息的模型相比基线模型（M_0）表现更好，证实了先前试次信息对当前知觉决策的影响。在位置不一致条件下，模型比较的结果也发现包含先前试次信息的模型（如M_2和M_3）要优于基线模型（M_0）（RL: ΔAIC_{M1} = 0.06, ΔAIC_{M2} = –4.95, ΔAIC_{M3} = –5.67; LR: ΔAIC_{M1}= –1.51, ΔAIC_{M2}= –6.94, ΔAIC_{M3}= –7.09）；但是相比位置一致条件，这种优势相对减弱。这再次说明，刺激位置一致性对时距知觉的序列依赖效应具有调节作用。

3.3 跨实验结果分析

实验 1 似乎表明相比中央视野，外周视野的刺激序列依赖效应更弱。为了进一步验证这一结果，我们将实验 2 中四种条件下的$\beta_{prev_stimulus}$系数进行平均，并与实验 1 中刺激位于中央视野的两种条件（CC 和 PC）的平均值进行比较。结果发现，刺激位于中央视野条件下的$\beta_{prev_stimulus}$系数显著小于刺激位于两侧视野的条件（–0.80 vs. –0.42, $t(45) = –2.14$, $p = 0.038$, Cohen's $d = –0.63$, 95% CI [–0.73, –0.02]）。这再一次证明了当刺激呈现在外周视野时会减弱刺激序列依赖效应。

此外，为了揭示非同质视野（实验 1：中央 vs. 外周视野）与同质视野（实验 2：左 vs. 右外周视野）间决策序列依赖效应迁移量的差异。我们分别将实验 1 和实验 2 位置一致条件（实验 1：CC 和 PP；实验 2：LL 和 RR）下的β_{prev_choice}均值与位置不一致条件（实验 1：PC 和 CP；实验 2：RL 和 LR）下的均值相减，以这一差值衡量迁移量的大小。差值越大代表迁移量越小。独立样本 t 检验表明，非同质视野的效应迁移量要显著小于同质视野间的效应迁移量（1.01 vs. 0.55, $t(45)= 4.64$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.35$, 95% CI [0.26, 0.65]）。这说明时距知觉的决策序列依赖效应在同质视野（左右视野为同质的外周视野，中央和外周视野为非同质视野）间迁移更大。

4 实验 3：时距知觉序列依赖效应在不同类型空间位置间的迁移性

在实验 1 和 2 中被试总是盯着一个固定的注视点，这就导致当刺激出现在屏幕不同的位置时，其外部空间和视网膜空间位置都发生了变化。因此，上述实验结果并不能明确表明空间信息对时距知觉决策序列依赖效应的部分制约作用是源于外部空间位置变化还是视网膜空间位置变化。鉴于早期视皮层和较高级视觉区域（如 VIP）表现出对不同类型（视网膜 vs. 外部）空间信息的敏感性(Duhamel et al., 1997; Kastner et al., 2001)，因此有必要在区分这两

种空间类型的基础上进一步探讨时距知觉序列依赖效应的空间迁移性。据此，实验 3 在有效分离视网膜空间和外部空间的条件下，探讨了不同类型空间位置变化对时距知觉序列依赖效应的影响。此外，为了探讨时距知觉的刺激和决策序列依赖效应的空间迁移性是否受到迁移距离的影响，实验 3 中无论是外部空间位置还是视网膜空间位置的迁移距离都为 20°（大于实验 1 和 2 中的 10°）。对这些问题的探讨，有助于进一步揭示时距知觉序列依赖效应产生的潜在神经位置。

4.1 方法

4.1.1 被试

24 名未参加实验 1 与实验 2 的在校大学生（19 名女性；平均年龄：19.8 岁，$SD = 2.41$ 岁）自愿参与并完成了实验 3。他们均是右利手，且视力或矫正视力正常，实验结束前被试对实验目的不知情。被试在实验开始前均签署了知情同意书，实验结束后给予被试一定的报酬。

4.1.2 刺激和仪器

实验 3 的刺激和仪器类似实验 1。不同之处在于，实验 3 的刺激通过一个高刷新率的液晶显示器呈现（刷新频率为 120 Hz，屏幕分辨率为 1920×1080 pixels）。此外，由于本实验中注视点会发生变化，为了确保实验中被试按要求进行了注视点的转移，实验中通过 Eyelink Portable Duo 眼动设备（采样率为 500 Hz，右眼采集）实时对被试的眼动情况进行了监控。实验中被试的头部由距显示屏 57 cm 的颌托固定，以减少头部晃动对眼动轨迹的影响。

4.1.3 设计

采用单因素的被试内设计，自变量为（前一试次和当前试次）测试刺激的位置关系，分为四种水平：外部空间变化（SC）、视网膜空间变化（RC）、外部和视网膜空间都变化（一致变化条件；BC）、外部和视网膜空间都不变（一致不变条件；NC）。因变量为被试判断当前测试刺激的呈现时间较先前的参照刺激长的比例。

如图 8 所示，外部空间变化条件是指先前和当前试次中刺激的外部空间位置发生变化，但它们在视网膜空间的相对位置不变；视网膜空间变化条件是指先前和当前试次中刺激在视网膜空间的相对位置发生变化，但它们的外部空间位置不变；一致变化条件是指先前和当前试次中刺激的外部空间位置和视网膜空间的相对位置都发生变化；一致不变条件是指先前和当前试次中刺激的外部空间位置和视网膜空间的相对位置都保持一致。

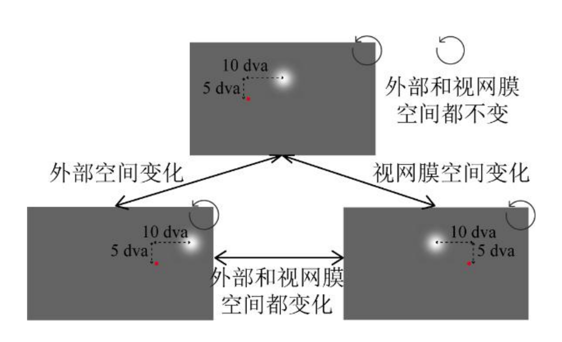


图 8 刺激位置关系说明图。根据先前试次和当前试次中刺激的位置关系，共分为四种条件：外部空间变化（SC），即先前和当前试次中刺激的外部空间位置发生变化，但它们在视网膜空间的相对位置不变；视网膜空间变化（RC），即先前和当前试次中刺激在视网膜空间的相对位置发生变化，但它们的外部空间位置不变；外部和视网膜空间都变化（一致变化条件；BC），即先前和当前试次中刺激的外部空间位置和视网膜空间的相对位置都发生变化；外部和视网膜空间都不变（一致不变条件；NC），即先前和当前试次中刺激的外部空间位置和视网膜空间的相对位置都保持一致。刺激与注视点的位置关系通过垂直和水平的视角度数（dav: degree of visual angle）标记。

4.1.4 程序

同实验 1，实验 3 采用了时距二分任务。如图 8，实验 3 包含三种刺激类型，分别为：注视点位于屏幕中央左侧，视觉刺激位于屏幕中央上方（LUC）；注视点位于屏幕中央右侧，视觉刺激位于屏幕中央上方（RUC）；注视点位于屏幕中央右侧，视觉刺激位于注视点右上方（RUR）。

实验分为 5 部分。为了更好地监控被试的眼动，在每部分实验开始之前进行眼动校正（5 点校正）。第一部分实验任务包含学习任务和测试任务，第二至五部分仅包含测试任务。在学习任务中，呈现时间为 520 ms 的三种类型的参照刺激随机呈现 15 次（每种类型刺激各 5 次）。具体来说，每个试次开始后，首先会在屏幕中央的左侧或者右侧呈现一个红色的注视点，此时被试需要根据要求在整个试次中对该点始终保持注视。实验中，只有当被试连续注视屏幕上的注视点 250 ms 后（判断依据为被试的注视位置离屏幕注视点中央的距离不超过 2°），试次才会正式启动，即在 500 ms 的空屏后呈现参照刺激。该任务中被试仅需记住参照刺激的呈现时间，无需反应。如果被试认为自己尚未记住参照刺激的呈现时间，则可以主动选择再次进行参照刺激的学习，该阶段可重复多次，直到被试认为自己掌握了该时长，方可进入正式测试阶段。在正式测试任务中，每个试次的流程类似于学习任务中的试次。不同之处在于，测试刺激的呈现时间为随机的 300~900 ms 范围中以等对数步长变化的五个时距之一；当测试刺激消失之后，被试需要根据记忆中参照刺激的呈现时间对测试刺激的呈现时间进行判断（具体反应方式同实验 1）。每一部分的正式测试任务包含 210 个试次（5 时距×3 刺激×14 次），每个被试共完成 1050 个测试试次。

4.1.5 数据分析

同实验 1，首先删除了每名被试反应时超过其反应时中数 3 个绝对中位差的试次(Leys et al., 2013)，该标准共删除了 8.0%的试次；随后求出每名被试在每种条件下的|PSE–520|和 JND，计算出相应位置条件下的时距知觉准确性和感受性。对于每种条件下的概率选择模型分析和统计同实验 1。

4.2 结果

图 9A 展示了实验 3 中一名具有代表性的被试在不同刺激类型下的时距知觉心理测量函数曲线。配对样本 *t* 检验发现，当刺激类型为 RUC 时，时距知觉的准确性（|PSE–520|）要显著高于 LUC 类型（73.31 ms vs. 93.82ms, $t(23) = 2.18$, $p = 0.040$, 95% CI [1.03, 39.99]），边缘显著高于 RUR 类型（73.31 ms vs. 91.29 ms, $t(23) = –1.89$, $p = 0.072$, 95% CI [–37.69, 1.74]）。LUC 和 RUR 类型间时距知觉的准确性则没有显著差异（93.82 ms vs. 91.29 ms, $t(23) = 0.38$, $p = 0.705$, 95% CI [–11.15, 16.22]）（图 9B）。这些结果表明，相比右上视野，当刺激位于左上视野时个体的时距知觉精度更高，这可能在一定程度上反映了左视野（即右半球）的时距加工的优势(张志杰 等，2006)。需要注意的是，在实验 2 中我们并没有观测到这种半侧视野的优势效应，这可能和该实验中刺激距离中央视野的距离较近（即 5°）有关。

时距知觉的感受性（JND）在三种刺激类型下都没有显著差异（LUC vs.RUC: 131.43 ms vs. 124.77 ms, $t(23) = 0.95$, $p = 0.350$, 95% CI [–7.78, 21.09]; LUC vs. RUR: 131.43 ms vs. 130.13 ms, $t(23) = 0.17$, $p = 0.869$, 95% CI [–14.85, 17.46]; RUC vs. RUR: 124.77 ms vs. 130.13 ms, $t(23) = –0.65$, $p = 0.521$, 95% CI [–22.32, 11.62]）（图 9C）。这些结果表明刺激类型对时距知觉的感受性没有影响。

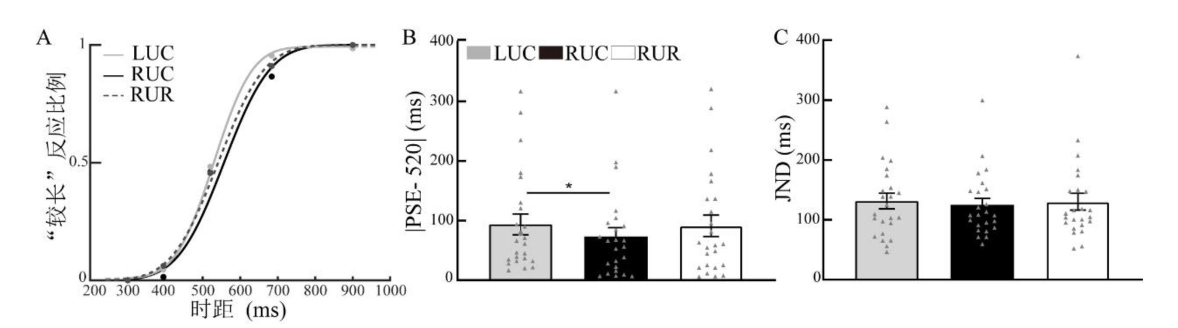


图 9 实验 3 心理测量结果。（A）一名代表性被试在不同刺激类型条件下（LUC vs. RUC vs. RUR）的心理测量函数（累积高斯函数）曲线。横坐标为测试刺激的呈现时间，纵坐标为被试判断测试刺激呈现时间“较长”的比例。图中灰色实曲线代表 LUC 条件，即注视点位于屏幕中央左侧，视觉刺激位于屏幕中央上方；黑色实曲线代表 RUC 条件，即注视点位于屏幕中央右侧，视觉刺激位于屏幕中央上方；灰色虚曲线代表 RUR 条件，即注视点位于屏幕中央右侧，视觉刺激位于注视点右上方；不同颜色的实

心圆点分别代表不同刺激类型条件下该名被试在不同时距下的长反应比例。（B）不同刺激类型条件下时距知觉的准确性（|PSE−520|）；（C）不同刺激类型条件下时距知觉的感受性（JND）。图中灰色三角形代表每种条件下每名被试的数据点；误差线代表标准误差；*$p < 0.05$。

对$\beta_{prev_stimulus}$系数进行单样本 *t* 检验。结果发现，在四种条件下，$\beta_{prev_stimulus}$都显著小于 0（SC: $t(23) = -5.84$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.19$, 95% CI [–1.66, –0.79]; RC: $t(23) = -6.38$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.30$, 95% CI [–1.34, –0.68]; BC: $t(23) = -6.21$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.27$, 95% CI [–1.58, –0.79]; NC: $t(23) = -5.24$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.07$, 95% CI [–1.56, –0.68]）。单因素重复测量方差分析发现，位置关系的主效应不显著（$F(3, 69) = 0.25$, $p = 0.861$）（图 10A）。这些结果再次证明时距知觉的刺激序列依赖效应不受刺激空间信息的制约。

单样本 *t* 检验也发现β_{prev_choice}在四种条件下均显著大于 0（SC: $t(23) = 6.60$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.35$, 95% CI [0.45, 0.85]; RC: $t(23) = 5.76$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.18$, 95% CI [0.34, 0.72]; BC: $t(23) = 7.18$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.47$, 95% CI [0.50, 0.90]; NC: $t(23) = 9.90$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 2.02$, 95% CI [0.93, 1.43]）。单因素重复测量方差分析发现，位置变化的主效应显著（$F(3, 69) = 8.54$, $p < 0.001$）。事后检验（Bonferroni）表明一致不变条件（NC）的β_{prev_choice}显著大于变化条件（SC: $p_{bonf} < 0.001$, Cohen's $d = -1.30$; RC: $p_{bonf} = 0.002$, Cohen's $d = -1.07$; BC: $p_{bonf} = 0.006$, Cohen's $d = -0.96$）（图 10B）。这说明无论视网膜空间还是外部空间位置发生变化都导致了决策序列依赖效应的部分降低。

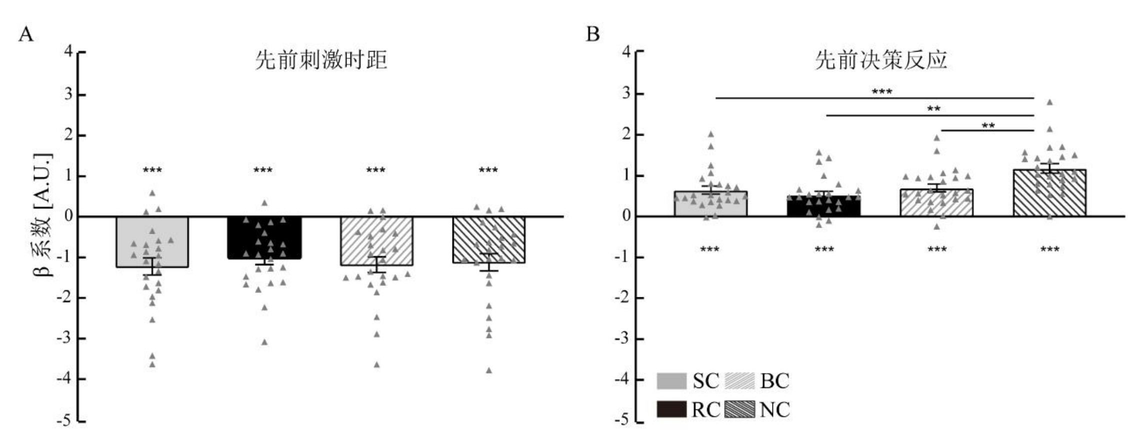


图 10 实验 3 模型中基于先前刺激时距（A）和决策反应（B）的β系数在不同条件下的大小。灰色实心条形图 SC 代表当前试次与前一试次的注视点、光斑刺激位置都不同，但两者的相对位置一致；黑色实心条形图 RC 代表当前试次与前一试次的注视点不同，但光斑刺激位置不变；浅色条纹条形图 BC 代表当前试次的注视点、光斑刺激的呈现位置以及它们之间的相对位置都不同；

深色条纹条形图 NC 代表当前试次与前一试次的注视点、光斑刺激的呈现位置相同。图中灰色三角形代表每种条件下每名被试的数据点；误差线代表标准误差；***$p < 0.001$，**$p < 0.01$。

实验 3 中三种刺激类型（LUC、RUC、RUR）随机呈现，这就导致符合（先前和当前试次）位置关系一致条件（NC）的试次数量要多于位置关系不一致条件（SC、RC、BC）的试次数量。由于试次数量对模型估计可能产生影响，因此我们做了一项补充分析。补充分析类似于正式实验的分析，不同之处在于，在进行模型估计之前，首先计算出每名被试三种位置关系不一致条件下的试次均值，然后从位置关系一致条件下随机选取相应的试次数量。结果表明，在平衡位置关系一致条件的试次数量之后，该条件下的决策序列依赖效应依然显著大于位置关系不一致条件（见附录，图 S2）。

最后，模型比较的结果表明，位置一致条件下（NC）的ΔAIC 值都明显小于零：M_3表现最佳（$\Delta AIC_{M3} = –21.35$），其次是M_2（$\Delta AIC_{M2} = –17.27$），最后是M_1（$\Delta AIC_{M1} = –2.21$）。这一结果同实验 1 和 2 一致，说明将先前试次信息纳入模型能够更好地解释被试当前的知觉决策。然而，在位置不一致条件下，ΔAIC 的值都相对较小（SC: $\Delta AIC_{M1} = –0.07$, $\Delta AIC_{M2} = 0.22$, $\Delta AIC_{M3} = –1.64$; RC: $\Delta AIC_{M1} = –0.09$, $\Delta AIC_{M2} = 0.12$, $\Delta AIC_{M3} = –1.38$; BC: $\Delta AIC_{M1} = 0.44$, $\Delta AIC_{M2} = –1.59$, $\Delta AIC_{M3} = –3.09$）。这说明相对于位置一致条件而言，位置不一致条件下先前试次信息对当前知觉决策影响的重要性明显降低（图 5C）。

5 讨论

本研究通过三个实验探讨了视觉时距知觉的刺激和决策序列依赖效应及其空间迁移性。结果发现，在视觉通道中先前试次的刺激时距和先前试次的决策反应对当前的时距知觉决策都会产生重要影响。具体来说，先前试次的刺激时距会导致时距知觉的排斥效应，使个体当前的时距知觉决策偏离先前的刺激时距（刺激序列依赖效应）；而先前试次的决策反应会导致吸引效应，使个体当前的时距知觉决策偏向先前的决策反应（决策序列依赖效应）。此外，本研究也发现刺激序列依赖效应并不受外部空间和视网膜空间位置的制约。然而，决策序列依赖效应虽然能够同时存在于中央和外周视野，但是其仅能在不同的外部空间和视网膜空间位置间进行部分迁移。这些结果一方面验证了在视觉通道中先前试次的刺激时距和先前试次的决策反应对后续时距知觉决策的独立影响，另一方面也说明这两种效应产生的内在机制不同。

前人研究采用传统的心理物理法探讨了时距知觉的序列依赖效应(Wehrman et al., 2020; Wiener et al., 2014)。然而，结果却发现在听觉通道中同时存在刺激序列依赖效应和决策序列

依赖效应(Wiener et al., 2014)，而在视觉通道中仅存在决策序列依赖效应(Wehrman et al., 2020; Wiener et al., 2014)。由于传统的心理物理法不能完全分离这两种效应，且这两种效应的作用方向可能是相反的，因此导致这一结果的原因可能是在视觉通道中的决策序列依赖效应大于刺激序列依赖效应，进而掩盖了刺激序列依赖效应。本研究采用决策概率模型分离了先前试次的刺激时距和先前试次的决策反应对后续时距知觉决策的影响，结果发现在视觉通道中同时存在方向相反的两种效应。这一发现与一项最近的研究结果一致，进一步说明了先前试次的刺激时距和决策反应都能够显著影响后续的时距知觉(Li et al., 2023)。

本研究发现时距知觉的刺激序列依赖效应能够在不同的空间位置迁移，这与由长时时距适应导致的时距知觉适应后效相似。时距知觉的适应后效也表现为一种排斥效应（负后效），且能够在不同的空间位置间迁移(Li, Yuan, Chen, et al., 2015)，说明这两种效应产生的机制可能相同。这再次支持了时距知觉的刺激序列依赖效应可能是一种短时程的快速适应现象的观点(Li et al., 2023)。值得注意的是，有研究发现时距知觉的适应后效受到适应时长的影响，短时程的适应（适应阶段呈现一个适应刺激）并不能导致时距知觉的适应后效(Heron et al., 2012; Li et al., 2017)。这似乎与本研究的结果不一致。然而，通过分析发现，之前的研究并没有考虑先前试次决策反应的影响，且试次间的间隔时间要大于本研究。这些因素可能在一定程度上削弱了适应效应。综上所述，本研究进一步为时距知觉的快速适应效应提供了实验证据。

相比中央视野，实验 1 的结果表明当刺激呈现在外周视野时，个体时距知觉的准确性和感受性都显著降低。考虑到中央视野的注意资源可得性要大于外周视野(Shapiro & Johnson, 1987)，且注意是影响时距知觉的重要因素(Matthews & Meck, 2016)。对此，一种可能的解释是对外周视野刺激的较少注意导致了其时距知觉准确性和感受性的降低。此外，注意也可以通过影响视觉加工的质量进而影响时距知觉。前人研究已表明相比中央视野，外周视野视觉加工的精度和敏度会随着其偏离中央视野的程度而逐渐降低(Rosenholtz, 2016; Strasburger et al., 2011)。由于时距知觉与刺激表征的清晰性密切相关(Matthews & Meck, 2016)，这也能够解释相比中央视野，当刺激呈现在外周视野时，被试时距知觉的准确性和感受性都显著降低的现象。尽管如此，我们发现中央视野和外周视野都存在显著的刺激序列依赖效应，这与前人关于朝向知觉的研究结果一致(Fischer & Whitney, 2014; Pascucci et al., 2019)。此外，相比中央视野，当刺激呈现在外周视野时，时距知觉的刺激序列依赖效应（而非决策依赖效应）也相应减弱。这说明时距知觉的刺激序列依赖效应同样依赖于注意或刺激表征的清晰性。

在视觉加工通路中，不同神经元的感受野会随着其所处的神经水平和刺激离心率的增加

而增加(Smith et al., 2001)。例如，以往对人类被试的 fMRI 研究发现，对于早期的视皮层（如 V1-V4），其群感受野（population receptive filed）即使在较大视觉离心率（eccentricity）条件下（如 8°）的范围也不超过 7°，且更多地被限制于对侧视野；而较晚的视皮层（如 MT/MST）则具有更大的群感受野和跨视野迁移的范围(Amano et al., 2009; Harvey & Dumoulin, 2011)。视皮层的这一特征也得到了以动物（如，猴子）为研究对象的电生理学研究的支持(Gattass et al., 1988)。本研究中无论是中央视野和外周视野刺激之间的距离（实验 1）还是左右视野刺激间的距离（实验 2）都等于 10°，结果发现刺激序列依赖效应不仅能够在中央和外周视野间完全迁移，而且能够在左右视野间完全迁移；该效应的迁移性不受空间类型（外部空间 vs. 视网膜空间）的影响，且并不随着迁移空间距离的增加而减小（实验 3 中无论外部空间迁移还是视网膜空间迁移距离都为 20°，依然观察到了完全迁移）。这种结果模式首先排除了时距知觉刺激序列依赖效应源于早期视皮层的假设。考虑到刺激序列依赖效应其实质是一种感知适应后效，这些结果说明，先前试次的刺激时距对后续时距知觉的影响可能发生在对空间信息不敏感或具有较大感受野（至少大于 20°）的较高级视觉加工脑区。最近 fMRI 的研究发现人类大脑的右侧顶叶存在对时距信息进行选择性加工的神经元，且这一区域的神经适应能够在一定程度上预测视觉时距知觉适应后效的大小(Hayashi & Ivry, 2020)。结合这一研究发现，可以推测该脑区可能也是时距知觉刺激序列依赖效应产生的潜在神经位置。因此，本研究的结果并不支持视觉时距知觉的长时适应和快速适应机制源于不同脑区神经适应的观点。

不同于时距知觉的刺激序列依赖效应，本研究发现时距知觉的决策序列依赖效应仅能在不同的空间位置间进行部分迁移，即空间信息对该效应具有部分制约作用。然而，这种制约作用并不受空间类型的调节。这些结果并不完全支持时距知觉的决策序列依赖效应源于早期视皮层的观点。这种外部空间和视网膜空间的同时制约作用似乎反映了早期视皮层和较高级的视皮层同时参与了决策序列依赖效应的产生；抑或是存在一种在表征视觉时距信息时同时对外部空间位置变化和视网膜空间位置变化敏感的脑区参与了决策序列依赖效应的产生。然而，这些假设却并不能很好地解释实验 1 和 2 的跨实验比较结果，即中央与外周视野间（非同质视野）的决策序列依赖效应的迁移量要小于左右外周视野间（同质视野）的迁移量。

此外，另一种可能的解释是，空间信息对时距知觉决策序列依赖效应的制约作用源于高级认知脑区的类别组织机制(Li et al., 2023)。的确，已有研究发现决策序列依赖效应受到刺激类别以及先后刺激相似性的影响(Feigin & Baror et al., 2021; Petzold & Haubensak, 2004)。例如，Petzold 和 Haubensak(2004)发现当要求被试将不同颜色的刺激看成不同类别的刺激时，

大小知觉的序列依赖效应受到刺激颜色的制约；反之，当要求被试将不同颜色的刺激看成同类别的刺激时，该效应则能够在不同颜色的刺激间迁移。根据这一假设，当先前试次和当前试次刺激的空间位置一致时，其更容易被归为同一类别，进而基于这些刺激的知觉决策相关性更大；反之，不同空间位置的刺激则较难归为同一类别，知觉决策的相关性减弱。因此，相比空间位置一致条件，空间位置不一致条件下的先前决策对后续知觉决策的影响更小，即决策序列依赖效应更小。这种高水平的类别组织机制涉及高级认知加工（如记忆或决策），具有相当的灵活性，因此，其既可以基于视网膜空间位置也可以基于外部空间位置进行。即只要个体意识到前后试次刺激空间位置的变化，这种类别组织机制就会发挥作用；并且决策序列依赖效应在空间不一致条件下降低的程度将主要取决于前后试次的类别差异程度。这在一定程度上也能够解释相比同质视野，非同质视野间决策序列依赖效应的迁移量更小的现象。Nagai 等人(2012)发现空间位置线索促进了不同的刺激分布对时序知觉的影响，说明基于空间位置线索的类别组织机制对个体形成多个类别的先验信息至关重要。这进一步支持了类别组织假设。在这一解释框架下，时距知觉的决策序列依赖效应可能源于记忆或决策相关的脑区，如后顶叶皮层（posterior parietal cortex，PPC）和前额叶（prefrontal cortex，PFC）等。已有研究发现这些脑区中保留了先前试次的决策信息，在决策序列依赖效应中扮演着重要作用(Hwang et al., 2017; Mochol et al., 2021)。然而，需要说明的是本研究为行为研究，仅能根据行为实验结果的模式推断时距知觉序列依赖效应产生的潜在神经机制，相关假设仍需后续研究结合认知神经科学技术（如 fMRI 和 TMS 等）进一步的检验。

结合上述分析，本研究发现的吸引性的时距知觉决策序列依赖效应可能与前人在其他知觉领域发现的决策惯性（decision inertia；个体倾向于重复先前的决策反应）现象一致(Akaishi et al., 2014; Pascucci et al., 2019)。这种现象反映了个体会在知觉决策中运用一种“自动学习机制”不断根据先前的决策反应更新当前知觉决策反应的可能性(Akaishi et al., 2014)。本研究发现，在时距知觉中这种决策序列依赖效应在一定程度上受到先前试次和当前试次刺激空间位置一致性的制约：尽管在一致和不一致条件下都观察到显著的决策序列依赖效应，但是一致条件下的效应显著大于不一致条件。这说明这种决策序列学习的“自动机制”在一定程度上取决于刺激序列的空间背景信息。

6 结论

结合时距二分任务和概率选择模型，本研究探讨了先前的刺激时距和先前的决策反应对后续时距知觉的影响。结果发现：（1）先前试次的刺激时距导致了显著的刺激序列依赖效应

（排斥效应），并且这种效应能够完全迁移到不同的空间位置；（2）先前试次的决策反应导致了显著的决策序列依赖效应（吸引效应），该效应受到先前试次与当前试次刺激空间位置一致性的调节，仅能部分迁移到不同的空间位置；（3）刺激和决策序列依赖效应的空间迁移性不受空间类型的调节。一方面，这些结果证实了在视觉时距知觉中，先前刺激和先前决策反应对后续时距知觉的不同影响（排斥 vs. 吸引）；另一方面，对空间迁移性的研究进一步揭示了先前刺激和先前决策反应对后续时距知觉的影响机制不同：不受空间信息制约的刺激序列依赖效应类似于时距知觉的适应后效，其可能源于对空间信息不敏感或具有较大感受野的较高级视觉加工脑区；决策序列依赖效应受到空间信息的部分制约，这种制约可能主要源于具有类别组织功能的高级认知脑区。本研究有利人们更好地理解时距知觉的可塑性及其内在机制。

参考文献

Akaishi, R., Umeda, K., Nagase, A., & Sakai, K. (2014). Autonomous mechanism of internal choice estimate underlies decision inertia. *Neuron, 81*(1), 195–206.

Amano, K., Wandell, B. A., & Dumoulin, S. O. (2009). Visual field maps, population receptive field sizes, and visual field coverage in the human MT+ complex. *Journal of Neurophysiology, 102*(5), 2704–2718.

Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision, 10*(4), 433–436.

Brimijoin, W. O., & O'Neill, W. E. (2010). Patterned tone sequences reveal non-linear interactions in auditory spectrotemporal receptive fields in the inferior colliculus. *Hearing Research, 267*(1–2), 96–110.

Burr, D., Tozzi, A., & Morrone, M. C. (2007). Neural mechanisms for timing visual events are spatially selective in real-world coordinates. *Nature Neuroscience*, *10*(4), 423–425.

Cicchini, G. M., Benedetto, A., & Burr, D. C. (2021). Perceptual history propagates down to early levels of sensory analysis. *Current Biology, 31*(6), 1245–1250.

Duhamel, J.-R., Bremmer, F., Ben Hamed, S., & Graf, W. (1997). Spatial invariance of visual receptive fields in parietal cortex neurons. *Nature, 389*(6653), 845–848.

Fang, F., Murray, S. O., Kersten, D., & He, S. (2005). Orientation-tuned fMRI adaptation in human visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, *94*(6), 4188–4195.

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods, 39*(2), 175–191.

Feigin, H., Baror, S., Bar, M., & Zaidel, A. (2021). Perceptual decisions are biased toward relevant prior choices. *Scientific Reports, 11*, 648.

Feigin, H., Shalom-Sperber, S., Zachor, D. A., & Zaidel, A. (2021). Increased influence of prior choices on perceptual decisions in autism. *Elife, 10*, e61595.

Fischer, C., Czoschke, S., Peters, B., Rahm, B., & Bledowski, C. (2020). Context information supports serial dependence of multiple visual objects across memory episodes. *Nature Communications, 11*(1), 889–920.

Fischer, J., & Whitney, D. (2014). Serial dependence in visual perception. *Nature Neuroscience, 17*(5), 738–743.

Gattass, R., Sousa, A. P., & Gross, C. G. (1988). Visuotopic organization and extent of V3 and V4 of the macaque. *Journal of Neuroscience, 8*(6), 1831–1845.

Harvey, B. M., & Dumoulin, S. O. (2011). The relationship between cortical magnification factor and population receptive field size in human visual cortex: Constancies in cortical architecture. *Journal of Neuroscience, 31*(38), 13604–13612.

Hayashi, M. J., & Ivry, R. B. (2020). Duration selectivity in right parietal cortex reflects the subjective experience of time. *Journal of Neuroscience, 40*(40), 7749–7758.

Heron, J., Aaen-Stockdale, C., Hotchkiss, J., Roach, N. W., McGraw, P. V., & Whitaker, D. (2012). Duration channels mediate human time perception. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 279*(1729), 690–698.

Huang, X. T., Guo, X. Y., & Nie J. (2003). The relationship between temporal and non-temporal information in cognitive processing. *Psychological Science, 26*(5), 770–774.

[黄希庭, 郭秀艳, 聂晶. (2003). 认知加工中时间与非时间信息的相互关系. *心理科学, 26*(5), 770–774.]

Hwang, E. J., Dahlen, J. E., Mukundan, M., & Komiyama, T. (2017). History-based action selection bias in posterior parietal cortex. *Nature Communications*, *8*(1), 1242.

Kass, R. E., & Raftery, A. E. (1995). Bayes factors. *Journal of the American Statistical Association, 90*(430), 773–795.

Kastner, S., De Weerd, P., Pinsk, M. A., Elizondo, M. I., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (2001). Modulation of sensory suppression: Implications for receptive field sizes in the human visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, *86*(3), 1398–1411.

Knapen, T., Rolfs, M., Wexler, M., & Cavanagh, P. (2010). The reference frame of the tilt aftereffect. *Journal of Vision*, *10*(1), 1–13.

Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P., & Licata, L. (2013). Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology, 49*(4), 764–766.

Li, B., Wang, B., & Zaide, A. (2023). Modality-specific sensory and decisional carryover effects in duration perception. *BMC Biology, 21*: 48.

Li, B., Xiao, L., Yin, H., Liu, P., & Huang, X. (2017). Duration aftereffect depends on the duration of adaptation. *Frontiers in Psychology, 8*, 491.

Li, B., Yuan, X., Chen, Y., Liu, P., & Huang, X. (2015). Visual duration aftereffect is position invariant. *Frontiers in Psychology, 6*, 1536.

Li, B., Yuan, X., & Huang, X. (2015). The aftereffect of perceived duration is contingent on auditory frequency but not visual orientation. *Scientific Reports, 5*, 10124.

Liberman, A., Fischer, J., & Whitney, D. (2014). Serial dependence in the perception of faces. *Current Biology, 24*(21), 2569–2574.

Manassi, M., Kristjansson, A., & Whitney, D. (2019). Serial dependence in a simulated clinical visual search task. *Scientific Reports, 9*(1), 19937.

Matthews, W. J., & Meck, W. H. (2016). Temporal cognition: Connecting subjective time to perception, attention, and memory. *Psychological Bulletin, 142*(8), 856–907.

Merchant, H., Harrington, D. L., & Meck, W. H. (2013). Neural basis of the perception and estimation of time. *Annual Review of Neuroscience, 36*, 313–336.

Michele, F., & Joonkoo, P. (2018). Serial dependence in numerosity perception. *Journal of Vision, 18*(9): 15, 1–12.

Mochol, G., Kiani, R., & Moreno-Bote, R. (2021). Prefrontal cortex represents heuristics that shape choice bias and its integration into future behavior. *Current Biology*, *31*(6), 1234–1244.e6.

Moon, J., & Kwon, O. S. (2022). Attractive and repulsive effects of sensory history concurrently shape visual perception. *BMC Biology*, *20*(1), 247.

Nagai, Y., Suzuki, M., Miyazaki, M., & Kitazawa, S. (2012). Acquisition of multiple prior distributions in tactile temporal order judgment. *Frontiers in Psychology, 3*, 276.

Pascucci, D., Mancuso, G., Santandrea, E., Della Libera, C., Plomp, G., & Chelazzi, L. (2019). Laws of concatenated perception: Vision goes for novelty, decisions for perseverance. *Plos Biology, 17*, e3000144.

Pelli, D. G. (1997). The videotoolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision, 10*(4), 437–442.

Petzold, P., & Haubensak, G. (2004). The influence of category membership of stimuli on sequential effects in magnitude judgment. *Perception & Psychophysics, 66*(4), 665–678.

Qiu, A., Rosenau, B. J., Greenberg, A. S., Hurdal, M. K., Barta, P., Yantis, S., & Miller, M. I. (2006). Estimating linear cortical magnification in human primary visual cortex via dynamic programming. *Neuroimage, 31*(1), 125-138.

Rosenholtz, R. (2016). Capabilities and limitations of peripheral vision. *Annual Review of Neuroscience, 2*, 437–457.

Schutt, H. H., Harmeling, S., Macke, J. H., & Wichmann, F. A. (2016). Painfree and accurate bayesian estimation of psychometric functions for (potentially) overdispersed data. *Vision Research, 122*, 105–123.

Shapiro, K. L., & Johnson, T. L. (1987). Effects of arousal on attention to central and peripheral visual-stimuli. *Acta Psychologica, 66*(2), 157–172.

Shuler M. G. (2016). Timing in the visual cortex and its investigation. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *8*, 73–77.

Smith, A. T., Singh, K. D., Williams, A., & Greenlee, M. (2001). Estimating receptive field size from fMRI data in human striate and extrastriate visual cortex. *Cerebral Cortex, 11*(12), 1182–1190.

St John-Saaltink, E., Kok, P., Lau, H. C., & de Lange, F. P. (2016). Serial dependence in perceptual decisions is reflected in activity patterns in primary visual cortex. *Journal of Neuroscience, 36*(23), 6186-6192.

Strasburger, H., Rentschler, I., & Juttner, M. (2011). Peripheral vision and pattern recognition: A review. *Journal of Vision, 11*(5), 13.

Wandell, B. A., Dumoulin, S. O., & Brewer, A. A. (2007). Visual field maps in human cortex. *Neuron*, *56*(2),

366–383.
Wehrman, J. J., Wearden, J., Sowman, P., & Psychophysics. (2020). Decisional carryover effects in interval timing: Evidence of a generalized response bias. *Attention, Perception, & Psychophysics, 82*(4), 2147–2164.
Wiener, M., Thompson, J. C., & Coslett, H. B. (2014). Continuous carryover of temporal context dissociates response bias from perceptual influence for duration. *Plos One, 9*(6), e100803.
Zhang, Z. J., Yuan, H., & Huang, X. T. (2006). The difference between sub-and supara-second interval processing：Evidence from an ERP study. *Psychological Science, 29*(1), 87–90.
[张志杰, 袁宏, 黄希庭. (2006). 不同时距加工机制的比较: 来自 ERP 的证据(Ⅰ). *心理科学, 29*(1), 87–90.]

Spatial generalization of serial dependence in visual duration perception

WANG Biyao[1], CHEN Chen[1], HU Xiaofei[1], WANG Di[1], LI Baolin[1]

([1]School of Psychology, Shaanxi Normal University, 199 Chang'an South Road, Yanta District, Xi'an 710062, China)

Abstract To establish a stable and sensitive experience of the world, the brain tends to use recent history when forming perceptual decisions. This results in serial dependence in perception, by which previous trials affect the current perception. The serial dependence effect can be divided

into (at least) two categories: the effect of previous stimuli (i.e., the stimulus serial dependence effect) and the effect of previous decisions (i.e., the decisional serial dependence effect) on the current perception. Although separate stimulus and decisional serial dependence effects have been demonstrated in duration perception, their spatial selectivity is unclear. In the present study, we investigated whether and how serial dependence in duration perception generalizes across different visual positions of stimuli.

The modified temporal bisection task was used in three experiments. Specifically, 24 naïve volunteers participated in Experiment 1. During the experiment, the visual stimulus (a white Gaussian blob) was pseudorandomly presented in the central or peripheral (10° from the left fixation) visual field. Participants were asked to judge whether the duration of the test stimulus (i.e., 300, 395, 520, 684, or 900 ms) was shorter or longer than a reference stimulus of intermediate duration (i.e., 520 ms) once the test stimulus disappeared. A group of 23 new volunteers were recruited for Experiment 2. The task of Experiment 2 was similar to that of Experiment 1, except that the visual stimulus was pseudorandomly located at either 5° to the left or 5° to the right of the central fixation. A new set of 24 volunteers participated in Experiment 3, in which the positions of both the fixation and the visual stimulus were changed; there were thus four types of positional relationships between stimuli across trials (i.e., identity, retinal position change, external position change, and both changes).

The results showed that previous stimulus duration and previous choice exerted opposing effects on serial dependence of duration perception: specifically, a repulsive stimulus serial dependence and an attractive decisional serial dependence. In other words, current duration estimates were repelled away from the previous trial's stimulus duration but attracted toward the previous choice. We found these effects in both the central and peripheral visual fields. More importantly, we found that the stimulus serial dependence effect was not constrained by the visual position of the stimuli: the effects were comparable between contexts in which the stimulus positions of previous and current trials were the same and when they were different. The effects fully transferred across the central and peripheral visual fields, across the left and right visual hemifields, and across different external spaces. However, we found that the decisional serial dependence effect was larger in the position-consistent context than in the position-inconsistent context. This indicates that the decisional serial dependence effect could only be partially

transferred across different visual positions regardless of the types of positions (i.e., spatiotopic vs. retinotopic).

These results provide evidence that both previous stimuli duration and previous choices affect subsequent perceptual decisions about duration, resulting in repulsive and attractive serial dependence effects, respectively. The repulsive stimulus serial dependence effect fully generalizes across different visual positions, suggesting it occurs primarily in higher-level visual areas. This also implies the existence of fast-duration adaptation. The attractive decisional serial dependence effect suggests that there is decision inertia in perceptual choices. Moreover, this effect is partly contingent on the visual position, which may result from the category organization function of higher-order brain areas. This suggests that the brain takes advantage of the visual position context when forming the decisional prior. These findings are helpful for understanding the plasticity of duration perception.

Key words duration perception, serial dependence effect, duration adaptation, decision inertia, spatial generalization

附录

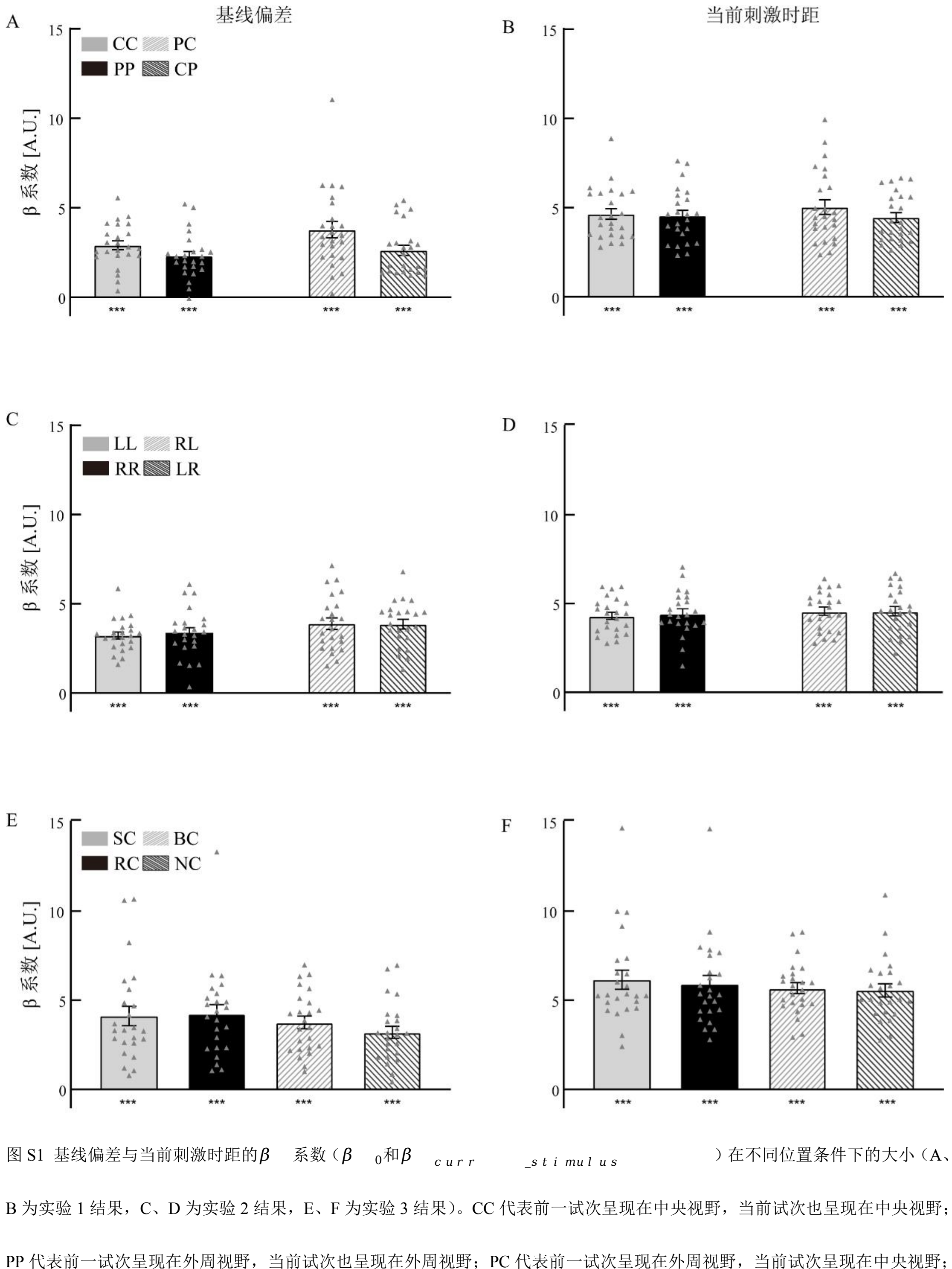


图 S1 基线偏差与当前刺激时距的β系数（β_0和$\beta_{curr_stimulus}$）在不同位置条件下的大小（A、B 为实验 1 结果，C、D 为实验 2 结果，E、F 为实验 3 结果）。CC 代表前一试次呈现在中央视野，当前试次也呈现在中央视野；PP 代表前一试次呈现在外周视野，当前试次也呈现在外周视野；PC 代表前一试次呈现在外周视野，当前试次呈现在中央视野；CP 代表前一试次呈现在中央视野，当前试次呈现在外周视野；LL 代表前一试次呈现在左侧视野，当前试次也呈现在左侧视野；RR 代表前一试次呈现在右侧视野，当前试次也呈现在右侧视野；RL 代表前一试次呈现在右侧视野，当前试次呈现在左侧视野；LR 代表前一试次呈现在左侧视野，当前试次呈现在右侧视野；SC 代表当前试次与前一试次的注视点、光斑刺激位置都不同，但两者的相对位置一致；RC 代表当前试次与前一试次的注视点不同，但光斑刺激位置不变；BC 代表当前试次的注视点、光斑刺激的呈现位置以及它们之间的相对位置都不同；NC 代表当前试次与前一试次的注视点、光斑刺激的呈现位置相同。图中灰色

三角形代表每种条件下每名被试的数据点；误差线代表标准误差；***$p < 0.001$。

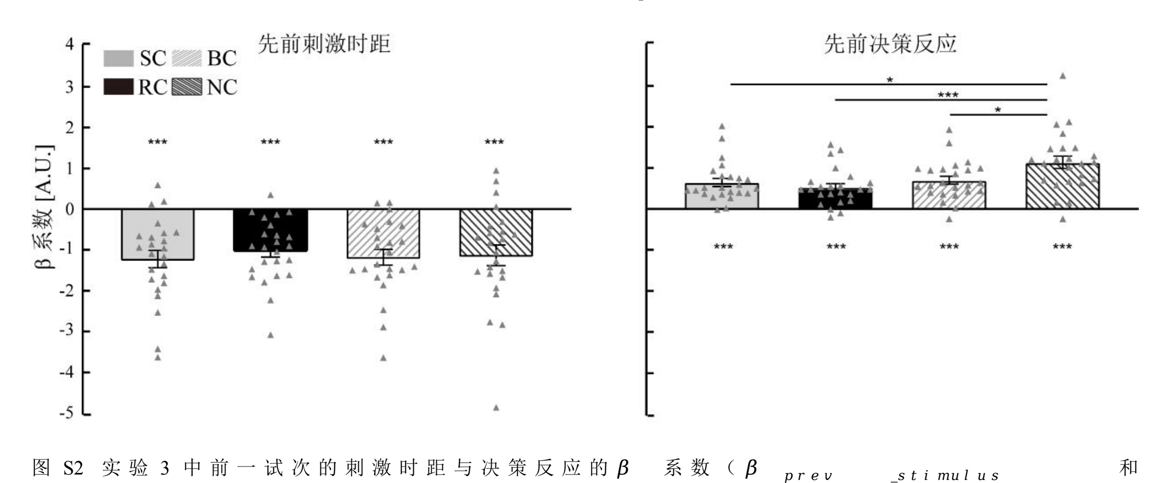


图 S2 实验 3 中前一试次的刺激时距与决策反应的 β 系数（$\beta_{prev_stimulus}$ 和 β_{prev_choice}）在不同位置条件下的大小（随机化结果）。SC 代表当前试次与前一试次的注视点、光斑刺激位置都不同，但两者的相对位置一致；RC 代表当前试次与前一试次的注视点不同，但光斑刺激位置不变；BC 代表当前试次的注视点、光斑刺激的呈现位置以及它们之间的相对位置都不同；NC 代表当前试次与前一试次的注视点、光斑刺激的呈现位置相同。图中灰色三角形代表每种条件下每名被试的数据点；误差线代表标准误差；***$p < 0.001$, *$P < 0.05$。